

Margo Luukkanen

LÄMPÖPINTOJEN PUHDISTUS JA KORROOSIO KAINUUN VOIMA
OY:N KIERTOPETIKATTILASSA

Insinöörityö

Kajaanin ammattikorkeakoulu

Tekniikan ala

Tuotantotekniikan kunnossapito

Kevät 2003



**Kajaanin
ammattikorkeakoulu**

INSINÖÖRITYÖ TIIVISTELMÄ

Tekijä(t) Margo Luukkanen	
Työn nimi Lämpöpintojen puhdistus ja korroosio Kainuun Voima Oy:n kiertopetikatilassa	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot	Ohjaaja(t) Mikko Heikkinen (AMK) Kimmo Keinänen (Kainuun Voima OY)
Kunnossapito	
Aika Kevät 2003	Sivumäärä 84+4
<p>Tiivistelmä</p> <p>Insinöörintyön ensisijaisena tarkoituksena oli selvittää ääninuohojen asennusmahdollisuutta Kainuun Voima Oy:n savukaasulämmönvaihtimeen sekä määrittää niiden takaisinmaksuaika. Työ suoritettiin osittain yhteistyössä ääninuohojen valmistaja Nira Fonin kanssa.</p> <p>Toinen osio keskittyi savukaasujen koostumuksen määrittämiseen ja korroosioon. Savukaasujen lämpötilan määrittäminen ja mahdollinen päästöjen rajoittaminen edellytti kemian paneutumista. Rikkipäästöjen vähentäminen työn tilaajan kattilassa onnistuu aika helposti syöttämällä kattilaan oikea määrä kalkkia suhteessa polttoaineen rikkipitoisuuteen. Vähentynyt rikkihappoksidin määrä savukaasuista voi myös auttaa laskevasti savukaasujen lämpötilaan. Lisäksi ilmanlaadun parantaminen on aina hyödyllistä ja se on rahassa mitattuna korvaamatonta.</p> <p>Työn tuloksiksi saatiin määritettyä ääninuohojen paikat savukaasulämmönvaihtimeen sekä niiden takaisinmaksuaika ja käyttöohjeistus. Takaisinmaksuajan tarkka määrittäminen etukäteen ennen ääninuohojen asennusta oli varsin hankalaa, koska osa laskuista perustui olettamuksiin. Kuitenkin saatiin määritettyä ne osatekijät, joihin mahdollisesti ääninuohojet voisivat vaikuttaa. Lisäksi saatiin määritettyä varsin hyödyllinen laskentataulukko, jonka avulla voidaan määrittää teoreettisesti palamisilman määrä, syntyvien päästöjen moolipitoisuudet ja mahdolliset kalkin syötön määrät eri polttoaineille.</p>	
Luottamuksellinen Kyllä Ei X	
Hakusanat Polttoaineen palaminen, lämpöpintojen puhdistus, korroosio	
Säilytyspaikka Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto	

Faculty Faculty of Engineering	Degree programme Production Engineering
Author(s) Margo Luukkanen	
Title The Cleaning of Heat Exchangers and Corrosion in the Steam Boiler	
Optional professional studies Maintenance	Instructor(s) / Supervisor(s) Mikko Heikkinen (Kajaani polytechnic) Kimmo Keinänen (Kainuun Voima Oy)
Date Spring 2003	Total number of pages 84+4
<p>Abstract</p> <p>This final year project was done to Kainuun Voima Oy. It includes two separate units. The first unit includes the installations of an acoustic cleaning system to the flue gas heat exchanger and specifies the repayment time of it. The second unit concentrates on specifying the composition of flue gas.</p> <p>Determining the temperature of the flue gas and possible reduction of emissions required knowledge in chemistry. Reducing the sulphur emissions in future will be very likely. The decreased amount of sulphur oxides in flue gas can help to lower the temperature of flue gas. An improvement in the quality of air is also always useful.</p> <p>The primary purpose of this final year project was to design the installation of a voice cleaning system. The first unit includes the installation manual of the voice cleaning system and the second part covers the results about the quality of the flue gas. Specifying the exact repayment time was difficult, because the calculations are partly based on assumptions.</p>	
Confidential Yes No X	
Keywords Steam power boiler, Heat exchanger, Acoustic cleaning system	
Deposited at Library of Kajaani polytechnic	

Alkusanat

Tämä insinöörityö on tehty Kainuun Voima Oy:lle. Kiitän kaikkia henkilöitä, jotka ovat vaikuttaneet insinöörityöni valmistumiseen. Erityisesti haluan kiittää koko Kainuun Voima Oy:n auttavaista henkilöstöä sekä työn valvojia Mikko Heikkistä (AMK) ja Kimmo Keinästä (KAVO).

Työ oli opettavainen ja mielenkiintoinen. Työn tilaajan puitteissa sain varsin vapaat kädet tehdä tätä työtä. Näin ollen ensimmäinen työ oli varsinaisesti se, että sain itse keksiä mistä insinöörityön voisi tehdä.

Tulevaisuudessa näyttääkin siltä, että tarkka poltonhallinta ja prosessin ohjaus näyttelevät suurta osaa energiatuotannossa. Toivonkin, että työstäni voisi olla jotain apua työn tilaajalle tulevaisuudessa.

Kajaanissa ____/____2003

Margo Luukkanen

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	7
2 TYÖN TAVOITTEET	10
2.1 Työn kuvaus	10
2.2 Vaadittavat dokumentit	10
3 POLTTOAINEET	11
3.1 Yleistä polttoaineista	11
3.2 Kierrätyspolttoaineet	12
3.3 Öljy	13
3.4 Turve	14
3.5 Puu- ja kuorijäte	14
3.6 Hiili	14
3.7 Polttoaineesta syntyvä jäte	15
4 POLTTOTEKNIikka	17
4.1 Eri polttotekniikat	17
4.2. Arinapoltto	17
4.3. Pölypoltto	18
4.4. Yleistä leijukerros-poltosta	19
4.5 Polttotekniikka Kainuun Voimalla	20
4.6 Ilmanesilämmitin (Luvo)	22
4.7 Kattilaveden kiertoperiaate	25
5 TUHKAN MUODOSTUMINEN	27
5.1 Lämpöpintojen likaantuminen	27
5.2 Tuhkaa muodostavat aineosat eri polttoaineissa	29
6 LÄMPÖPINTOJEN KORROOSIO JA EROOSIO	30
6.1 Rikkihappokorroosio	30
6.2 Savukaasulämpötilan merkitys rikkihappokorroosioon	32
6.4 Kalkin syöttö	36
6.5 Savukaasulämpötilan noston vaikutukset	39
6.7 Polttoaineen merkitys korroosioon	42
6.7 Eroosio	43
7 LÄMPÖPINTOJEN PUHDISTUS	45
7.1 Yleistä nuohouksesta	45
7.2 Nuohouslaitteet	48
7.3 Seinänuohoin	49
7.4 Ulosvedettävä nuohoin	49
7.5 Yksisuutinnuohoin	50
7.6 Monisuutinnuohoin	51
7.7 Haravanuohoin	52
7.8 Pyörivän luvon nuohoin	52
7.9 Kuulanuohouslaitteet	54
7.10 Mekaaniset ravistuslaitteet	55

7.11 Ääninuohouslaitteet	56
8 ÄÄNINUOHOIMET KAINUUN VOIMA OY:N LUVOSSA	59
8.1 Alkutietojen kerääminen	59
8.2 Ääninuohoimien investointikustannukset	61
8.3 Ääninuohoimien asennus luvoon	64
8.4 Ääninuohoimien käyttöohjeistus	65
8.5 Höyrynuohoimista aiheutuvat kustannukset	68
8.6 Ääninuohoimista aiheutuvat kustannukset ja mahdolliset edut	73
9 TULOSTEN KÄSITTELY	80
9.1 Takaisinmaksuaika	80
9.2 Ääninuohoimien käyttöohje	81
9.3 Savukaasujen loppulämpötilan määrittäminen	81
10 YHTEENVETO	83
LÄHDELUETTELO	84

- LIITTEET
- [A] CAD-kuva, ääninuohoimien asennusehdotus
 - [B] CAD-kuva, ääninuohoimien eristyskotelo
 - [C] polttoaineiden komponentit ja laskentataulukko

1 JOHDANTO

Kainuun Voima Oy on sähkön, kaukolämmön ja prosessihöyryn tuotantoa harjoittava yritys, jolla on Kajaanissa kattilateholtaan 240 MW:n höyryvoimalaitos sekä kolme sähköteholtaan yli 30 MW:n vesivoimalaitosta. Lisäksi Kainuun Voimalla on seisokkiaikana ja huippukuormien tasaajana toimiva varakattila, jonka lämpöteho on 120 MW. Voimalaitos työllistää 42 henkilöä ja polttoaineen toimituksessa useita kymmeniä henkilöitä.

Pääkattila:

- valmistaja: Ahlström
- kattilatyyppe: kiertopetikattila
- höyryn määrä 100 kg/s
- höyryn lämpötila 535 °C
- höyrynpaine 135 bar
- lämpöteho 240 MW
- sähköteho 88 MW

Kainuun Voima Oy on Kajaanin kaupungin ja Kajaani Oy:n (nykyisin UPM-Kymmene) yhteisvoimin rakentama voimalaitos. Kainuun Voima Oy:n perustava yhtiökokous pidettiin 26.6.1986. Omistuspohja jaettiin tasan Kajaanin kaupungin ja Kajaani Oy:n kanssa.

Voimalaitos tuottaa höyryä ja vastapainesähköä vieressä olevalle UPM:n paperitehtaalte sekä kaukolämpöä Kajaanin kaupungille ja vastapainesähköä maakunnalle.

Ruotsalainen Granninge-konserni on vuokrannut käyttöönsä Kajaanin kaupungin omistaman 50 %:n osuuden Kainuun Voiman tuotantokapasiteetista pitkäaikaisella, omistusoikeuteen verrattavalla vuokrasuhteella.

Kainuun Voiman höyryvoimalaitos on Suomen ensimmäinen yhdyskunnan ja teollisuuden yhteishanke, jossa tuotetaan energiaa kummankin osapuolen tarpeisiin. Höyryvoimalaitos rakennettiin vuosina 1987 - 1989 Tihisenniemen teollisuusalueelle, ja se otettiin kaupalliseen käyttöön 1.11.1989. Käyttöönoton jälkeen Kajaanin ilman laatu on merkittävästi parantunut, vaikka energiantuotanto on kasvanut huomattavasti.

Valtaosa Kainuun Voiman höyryvoimalaitoksessa tuotetusta sähköstä on kaukolämmön tuotannon yhteydessä syntyvää vastapainesähköä. Tällaisen yhteistuotatoprosessin hyötysuhde on erittäin hyvä, sillä polttoaineen energiasisällöstä saadaan hyödynnettyä parhaimmillaan lähes 90 prosenttia. Pelkässä sähköntuotannossa jäädään yleensä noin 40 - 45 prosentin hyötysuhteeseen.

Prosessissa syntyy huomattava määrä lentotuhkaa ja muita päästöjä. Haitallisin päästöistä on rikkidioksidi (SO_2). Rikkidioksidia syntyy pääasiassa hiilen, turpeen ja öljyn poltossa. Suurin osa polttoaineen sisältämästä rikistä hapettuu rikkidioksidiksi savukaasuihin. Pienin osa rikistä jää poltossa syntyvään tuhkaan. Kattilan lämpöpintojen (konvektiopinnat) puhdistamisen yhteydessä, eli nuohouksen aikana, rikkidioksidi reagoi nuohouksessa käytetyn höyryn kanssa muodostaen rikkihappoa. Rikkihappo (H_2SO_4) aiheuttaa haitallista korroosiota etenkin savukaasujen lämmönvaihtimen kohdalla, jossa lämpötila on otollinen rikkihapon synnylle ($<200^\circ\text{C}$). Savukaasujen lämmönvaihtimesta, jolla lämmitetään palamisilmaa, käytetään yleisesti nimitystä luvo.

Nuohouksessa kulunut höyryn määrä on huomattavan suuri, koska nuohousaika on pitkä, yht. n. 2 h 13 min. Näin ollen kosteudenkin määrä on huomattava ja otollinen rikkihapon synnylle. Nuohouksen sanotaankin olevan kattilamiesten keskuudessa ”välttämätön paha”. Nuohouksessa syntyvät kustannukset ovat huomattavia, johtuen suurista kunnossapitokustannuksista, laitteiston investoinneista ja käytetystä höyryn määrästä, joka kasvattaa lisäveden tarvetta.

Yleinen trendi kattilavoimaloissa näyttäisi olevan siirtyminen perinteisten höyrynuohoimien käytöstä ääninuohoimiin. Suomessa ääninuohoimia on jälkiasennettu höyrynuohoimien tilalle jo useaan kymmeneen voimalaan. Ääninuohoimien etu näyttääkin olevan höyrynuohoimiin verrattuna kiistaton. Ainoa ongelma näyttäisi olevan positioiden ja puhdistustehokkuuden määrittely puhdistettavalle kohteelle. Kuitenkin eri voimalaitoksista saadut positiiviset kokemukset näyttävät lupaavilta. Jopa luvon ja tulistinalueiden ongelmalliset nuohousalueet pystytään kokemuksien mukaan pitämään puhtaina ääninuohoimilla.

Tämän insinööriyön sisältämät tiedot ovat osittain itse työssä opittuja. Minulla on omakohtaista työssä opittua tietoa työn tilaajan höyrykattilavoimalasta noin 1,5 vuoden ajalta. Tästä johtuen lähteistä ei mahdollisesti kaikkia kyseisiä tietoja löydy. On myös huomioitava, että jokainen höyrykattilavoimala on oma yksilönsä. Esimerkiksi kahta samanlaista höyrykattilavoimalaa ei tiettävästi koskaan ole rakennettu. Tästä johtuen jokaisella höyrykattilalaitoksella on ”omat ongelmansa”.

2 TYÖN TAVOITTEET

2.1 Työn kuvaus

Aloitushetkellä työn tilaajalla eli Kainuun Voima Oy:llä on käytössä 30 kpl höyrynuohoimia. Näistä 2 sijaitsee luvon kohdalla, yksi kuumalla puolella ja yksi kylmällä puolella. Tarkoituksena Kainuun Voimalla on kokeilla ääninuohoimia ensin luvon kohdalla, sekä myöhemmässä vaiheessa muualla kattilassa, jos kokemukset ovat lupaavia. Luvon kohdalla ääninuohoimien tarve on ”kiireellisin”, jotta päästäisiin eroon höyrynuohoimien aiheuttamasta kosteuden lisääntymisestä. Kosteuden lisääminen vastaavasti lisää rikkihappokorroosiota.

Tässä insinööritöössä pyritään selvittämään höyrynuohouksesta ja likaantumisesta johtuvia ongelmia ja määrittämään uuden ääninuohousjärjestelmän positiot ja käyttöä luvon kohdalla. Ääninuohoimien positioiden ja lukumäärän määrittäminen tehdään yhteistyössä ääninuohoinlaitevalmistaja Nirafon Oy:n kanssa.

Lisäksi tulee selvittää ääninuohoimien puhdistustehokkuuden riittävyyttä sekä syntyviä kunnossapitokustannuksia. Puhdistustehokkuuden ja kunnossapitokustannusten selvittämisen ainoa keino on olla yhteydessä eri höyrykattilavoimalaitoksiin, joihin ääninuohoimia on asennettu.

2.2 Vaadittavat dokumentit

Työn tavoitteena on saada työn tilaajalle yksityiskohtainen kustannusarvio, josta selviävät tarvittavat investointikustannukset sekä ääninuohoinlaitteiston takaisinmaksuaika. Lisäksi tavoitteena on määrittää työn tilaajalle nuohoimien käyttöä koskeva ohjeistus sekä kerätä teoriaosassa ”tietopaketti”, josta voisi olla tulevaisuudessa hyötyä työn tilaajalle, esim. savukaasujen lämpötilamuutoksien määrittelyssä.

3 POLTTOAINEET

3.1 Yleistä polttoaineista

Polttoaineiden varsinaiset palavat komponentit ovat hiili, vety ja rikki, joista rikki on kuitenkin ei-toivottu, koska se palaessaan muodostaa ympäristölle ja kattilalle haitallista rikkioksidia. Polttoaineessa oleva vesi puolestaan vaatii tulipesässä suuren höyrystymislämmön, jota ei kattilassa yleensä ole mahdollista saada talteen. Tätä kautta polttoaineen kosteus pienentää sen lämpöarvoa. Maaperästä polttoaineeseen tulleet epäpuhtaudet lisäksi vaikuttavat suuresti siihen, miten poltossa syntyvä tuhka käyttäytyy. [3]

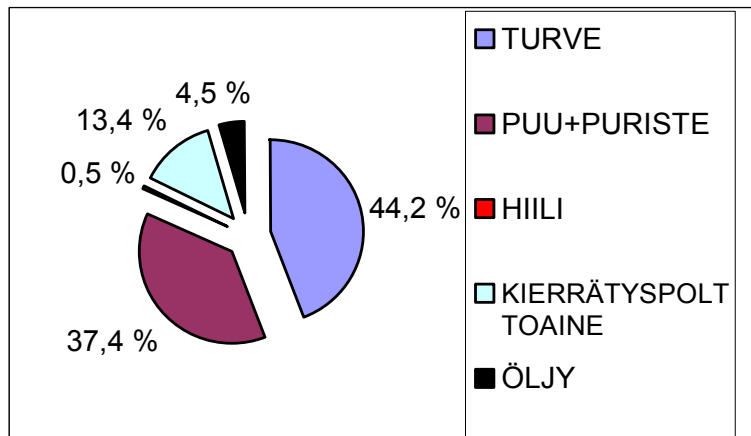
Käytetyllä polttoaineella ja koostumuksella on suuri merkitys tuhkan syntyyn ja lämpöpintojen likaantumiseen sekä korroosioon. Kainuun Voiman höyryvoimalaitoksen pääpolttoaineet ovat viereisen paperitehtaan ja sahan puu- ja kuorijäte sekä turve, joilla katetaan huomattava osa energiantuotannosta.

Polttoainetta kuluu kattilan täydellä kuormalla noin neljän rekka-auton verran tunnissa. Tämä tarkoittaa noin 50 kg/s. Hiiltä ja öljyä käytetään ainoastaan voimalan ylösajo- ja häiriötilanteissa. Lisäksi poltetaan jonkin verran paperitehtaan biologisen vedenpuhdistamon puristetta, syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä ja rata-pölkkyhaketta (taulukko 1).

Kainuun Voimalla otetaan näytteet jokaisen polttoainetoimittajan tuomasta kuormasta. Näistä näytteistä selvitetään polttoaineen sisältämä kosteus. Kosteuden avulla saadaan selville polttoaineen sisältämä lämpöarvo (lämpöarvo määritetään erikseen sertifioidussa tutkimuslaitoksessa). Kosteuden määrittämisessä noin 300 g:n näyte laitetaan kiertoilmauniin 100 °C:seen. Näytteen annetaan olla uunissa noin 12 h. Tämän jälkeen verrataan näytteen kuivapainoa märkäpainoon ja laskeaan kosteusprosentti.

Erityisesti kotimaisten polttoaineiden, puun ja turpeen, vesipitoisuus on suuri. Bio-polttoaineissa, puussa ja kuoressa, on vettä 55 - 60%.[2, s. 39]

Taulukko 1. Polttoaineenkäyttö 2001 Kainuun Voima Oy



Polttoaineiden kotimaisuusaste on parhaimmillaan lähes 100 %. Voimalan lämmöntuotanto on noin 1500 GWh, sähkön tuotanto noin 390 GWh. Perustuotannosta noin 1040 GWh 55 % menee paperitehtaan tarpeisiin, ja 45 % kaukolämmön tarpeisiin.

3.2 Kierrätyspolttoaineet

Kierrätyspolttoaineen osuus on noussut tasaisesti jo usean vuoden ajan. Kierrätyspolttoaine on käsitelty sopivan kokoiseksi esim. murskaamalla, ja sen pitää olla koostumukseltaan tunnettua. Kierrätyspolttoaineeksi eivät sovellu biojäte, metallit, lasi ja PVC-muovit (polyvinyylikloridi). PVC:n palaessa syntyy vetykloridia, joka on syövyttävää. PVC on yleisesti käytetty kestämuovi. Suomessa arvioidaan syntyvän muovijätettä noin 250 000 t, josta PVC:n osuus on noin 5000 t.

Kierrätyspolttoaine on useasti valtaosin puuta ja sen polttotekninen laatu on hyvä. Klooripitoisuus on noin 0,1 %, tuhkapitoisuus 2 - 5 % ja kosteus noin 20 %. Energiasisältö on 18 - 20 MJ/kg [1, s. 237]. Lisäksi laitoksella poltetaan paperitehtaalla syntyvää jätepaperia, pahvia ja kartonkia.

Kierrätyspolttoaineen sisältämä teräs saadaan voimalaitoksella eroteltua voimakkaalla magneetilla kohtuullisen tarkasti. Sen sijaan esim. alumiini ja haponkestävä teräs pääsevät läpi magneettierotuksessa. Läpi päässeet metallit aiheuttavat kuljetinvaurioita ja kattilaan päästyään tarpeetonta harmia kuluttaen esim. kattilaputkistoja.

Alumiini ja muut kevytmetallit saattavat aiheuttaa matalan sulamislämpötilan vuoksi, vakavia kuonaantumisongelmia. Etenkin jos pisaroitunut (sulanut) metalli pääsee savukaasujen mukaan konvektiopinnoille.

Ratapölkystä saatavaa energian osuutta voidaan pitää huomattavana. Ratapölkkyt toimittaa Huurinainen Oy, joka käsittelee pölkkyt polttoon sopivaksi murskaamalla. Vuonna 2001 ratapölkyn osuus oli 162 GWh eli noin 10 % energian tuotannosta. Ratapölkkyt on yleensä kyllästetty kreosoottikyllästysaineella (kivihiihi-terva). Kyllästetyssä puussa niiden pitoisuudet ovat pienet ja ne palavat leijukerrospoltoissa haitattomiksi yhdisteiksi. Kuitenkin ratapölkyn kyllästeaineen sisältämästä kivihiilestä vapautuu polton aikana jonkin verran rikkiä.

3.3 Öljy

Taulukon 1 suuri öljyn osuus selittyy sillä, että seisokin aikana ja huippukuormien tasaajana toimii varakattila. Varakattilan (Tamentec 1999) polttoaineena käytetään öljyä, joka on vähärikkistä raskasta polttoöljyä. Pääkattilassa öljyä ei käytetä varsinaisesti energiantuotantoon. Pääkattilassa öljyä käytetään kattilan ylösajoihin starttipolttimissa ja kanavapolttimissa, joilla lämmitetään palamisilmaa.

Voimalaitoksella poltetaan myös tehdasalueella syntyvät jäteöljyt. Jäteöljyä syntyy noin 80 t vuodessa, ja se poltetaan sekoittamalla öljy polttoturpeeseen.

3.4 Turve

Turpeena käytetään joko pala- tai jysinturvetta. Turpeen osuus polttoaineista on vaihdellut viime vuosina rajusti, johtuen turpeen verotuksesta sekä jonkin verran saatavuudesta. Vuonna 1998 turpeen osuus oli peräti 66,6 %, mutta vastaavasti vuonna 2000 vain 33,0 %. Turve sisältää jonkin verran rikkiä (n.0,2% kuivapainosta), kuitenkin kuormien ollessa suuret, voi turvetta kulua kattilassa jopa noin 50 kg/s. Niinpä rikin vapautuminen on huomattavaa. Turpeen poltossa voidaan myös pitää haittapuolena suurta tuhkan määrää verrattuna moniin muihin polttoaineisiin (noin 5%). Lisäksi turve sisältää kovia kvartsiyhdisteitä, jotka varsinkin leijupetipoltossa aiheuttavat eroosiota. Turpeen sisältämä kosteus on noin 40 - 50 %.

3.5 Puu- ja kuorijäte

Puujätteen (puru, kuori, hake) ja biologisen puhdistamon kuivatun lietteen määriin sisältyy myös tehdasalueelta tuleva palava jäte (paperi-rullan pohjat, jätepaperi ym.). Puru tulee pääosin UPM:n sahalta omaa paineilmakuljetinta pitkin polttoainesiihoon.

Kuori tulee UPM:n kuorimosta, jossa se on käsitelty polttoon sopivaksi. Kuorimossa kuoresta puristetaan suurin osa vedestä pois, ja se kuljetetaan hihnakuljetinta pitkin polttoainesiihoon. Kuoren kuiva-ainepitoisuus pyritään pitämään yli 35 %:ssa. Kuori aiheuttaa jonkin verran harmia kuljettimissa, eikä se ole energiasisällöltään kehuttava.

3.6 Hiili

Hiiltä käytetään ainoastaan voimalan ylösajovaiheessa ja häiriötilanteissa. Häiriötilanteita ovat esim. pääpolttoaineen syöttöhäiriöt kattilaan ja alapeti-lämpötilan lasku asetetun raja-arvon alle (n. 530 °C).

Kivahiili sisältää hiiltä noin 85 % ja paljon rikkiä verrattuna muihin polttoaineisiin. Tuhka- ja rikkijäte aiheuttavat ongelmia kattilassa ja savukaasuissa. Rikki aiheuttaa korroosiota kattilassa sekä vesistöjen ja maaperän happamoitumista. Kivahiilen lämpöarvo on 24 MJ/kg, riippuen kuitenkin kosteudesta.

Hiilen tuhkapitoisuus on poikkeuksellisen suuri. Polttoainekiloa kohti syntyy noin 0,1 kg tuhkaa, joka on peräisin osin hiiliesiintymiä ympäröivistä hiekka- tai savi- maakerroksista ja osin polttoaineessa itsessään olevista palamattomista aineista. [3]

3.7 Polttoaineesta syntyvä jäte

Suurin laitoksella syntyvä jäte-erä on lentotuhka, jota muodostuu noin 20.000 t vuodessa. Lentotuhkan osuus on tyypillisesti 60 - 70 % koko tuhkamäärästä. Tämä tarkoittaa sitä, että keskimäärin jokaista polttoainetonnin kohden syntyy lentotuhkaa noin 30 kg, jos poltetaan pelkästään turvetta.

Lentotuhka on pääasiallisesti viety kaatopaikalle, ja vain vähän sitä on saatu hyötykäyttöön. Tuhkaa on kokeiltu metsälannoitukseen, tiepenkkojen täyteaineena sekä asfaltin ja betonin raaka-aineena. Kuitenkin 2000 - luvulla käytännössä kaikki lentotuhka on viety kaatopaikalle. Lentotuhka sisältää paljon eri raskasmetalleja (taulukko 2).

Polttoaineen sisältämä tuhka aiheuttaa seuraavia haittoja:

- tuhka vähentää polttoaineen lämpöarvoa
- tuhka likaa kattilan lämpöpintoja
- tuhka kuluttaa polttoaineen käsittelylaitteita
- tuhka saattaa muodostaa lämpöpinnoille syövyttäviä kerrostumia
- savukaasut on puhdistettava lentotuhkasta
- lämpöpinnot on puhdistettava liasta nuohouslaitteilla
- omakäyttösähkön kulutus kasvaa (savukaasuvirta, likaantuminen)

Tuhkan sulamispiste on kattiloiden toiminnalle tärkeimpiä tuhkan ominaisuuksista. Esim. turvetta polttavissa leijukerroskattiloissa on leijukerroksen lämpötila pidettävä niin alhaisena, ettei tuhka pääse sulamaan. Mikäli tuhka sulaa, se muodostaa jäähtyessään leijukerroksesta kiinteän, kovan paakun, jonka rikkominen ja poistaminen kattilasta on erittäin työlästä.[3]

Pohjatuhkaa syntyy noin 800 t vuodessa, ja se käytetään tehdasalueella maanpinnan muotoiluun. Pohjatuhka on pääasiassa karkenevaa petihiekkaa, ja siinä on jonkin verran tuhkaa. Pohjatuhkaa seulotaan säännöllisin väliajoin kattilan pohjasta.

Taulukko 2. Tuhkan raskasmetallipitoisuudet 1994 [Kainuun Voima Oy]

	mg/kg
Arseeni (As)	54,2
Kadmium (Cd)	2,1
Kromi (Cr)	109
Lyijy (Pb)	35,6
Elohopea (Hg)	0,07
Nikkeli (Ni)	86,2
Vanadiini (V)	169

4 POLTTOTEKNIikka

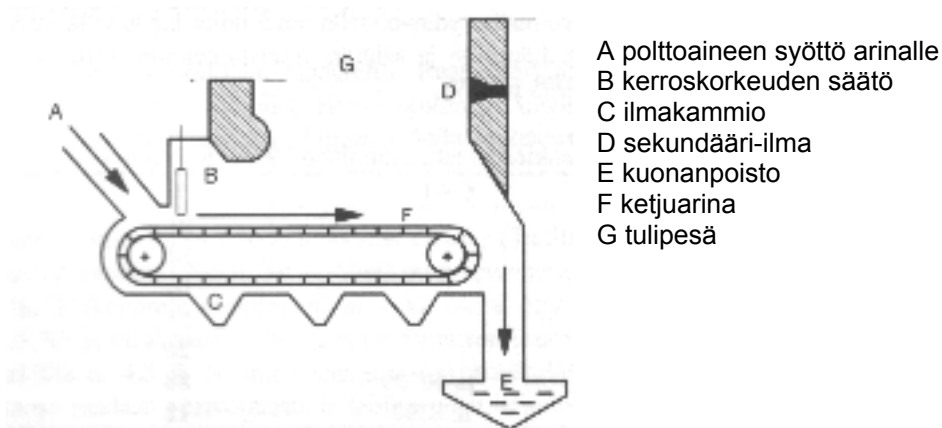
4.1 Eri polttotekniikat

Eri polttoprosessit eroavat toisistaan käytetyn polttoaineen ja polttotekniikan perusteella. Käydään läpi pääpiirteiltään käytetyimmät polttomenetelmät, sekä tarkemmin Kainuun Voimalla käytössä oleva menetelmä. Kolme yleisintä polttotekniikkaa kiinteille polttoaineille:

- arinapoltto
- pölypoltto
- leijukerrosolotto

4.2. Arinapoltto

Arinapollossa polttoaine on sopivaan muotoon käsiteltyä, esim. murskattua. Polttoaine johdetaan arinalle esim. sulkusyöttimen avulla. Palaminen tapahtuu liikkuvalla arinalla (kuva 1). Palamisilma johdetaan osittain arinan läpi. Arina on jaettu eri vyöhykkeisiin, joissa tapahtuu kuivuminen, pyrolyysi ja jäännöskoksin palaminen. Alun perin ketjuarinaa on käytetty kivihiilen polttoon, mutta nykyään sitä käytetään lähes kaikkiin kiinteisiin polttoaineisiin.



kuva 1. Ketjuarinan toimintaperiaate [2, s.60]

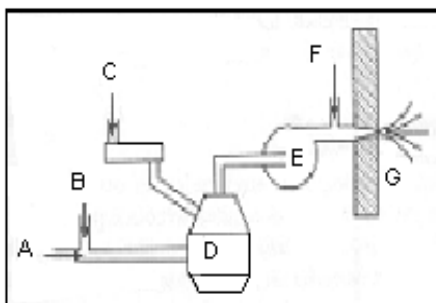
Arinapolton ongelmana on palamisen vaikea hallinta ja sitä kautta päästö- ja likaantumisongelmat. Nuohous eli tuli- ja lämpöpintojen puhdistus on suurissa kattiloissa hankalaa.

Arinapoltto soveltuu pienten kattiloiden polttotekniikaksi. Arinapolttotekniikkaa käytetään lähinnä pienissä, lämpötehoiltaan noin 5 MW:n suuruisissa kattiloissa. Tällöin savukaasujen hiukkaspäästöt saadaan asianmukaisesti poistettua syklo-neilla ja sähkösuodattimilla, koska suurin osa tuhkasta jää arinalle.[2]

4.3. Pölypoltto

Pölypoltto on yleisin kiinteän polttoaineen polttotapa maailmassa. Poltto voidaan toteuttaa joko sulapesäpolttona, jossa tuhka poistetaan tulipesästä sulassa muodossa, tai kuivaa tuhkaa poistaen, mikä on Suomessa käytössä oleva tapa. [1, s.212]

Myös pölypoltto on alun perin kehitetty hiilen polttoon. Pölypoltossa on mahdollista käyttää myös puuta ja turvetta. Periaatteessa pölypoltto soveltuu kaikenkokoisille kattiloille, mutta vaadittavien laitteistojen kalliit investointikustannukset tekevät sen kannattavaksi vain suurilla kattiloilla.



- A palamisilma
- B savukaasun kierrätys
- C hiilen syöttö annostelijaan
- D hiilimylly
- E puhallin
- F lisäilma
- G poltin

Kuva 2. Hiilen pölypolton periaatekuva [2, s.61]

Hiili syötetään polttoaineen jauhamista varten hiilimyllyyn, johon samanaikaisesti tuodaan polttoaineen kuivaamiseen tarpeellinen palamiskaasun ja ilman seos. Myllyssä pölyksi jauhettu hiili johdetaan puhaltimen avulla tulipesään. Ennen tuli-

pesää tai vasta tulipesässä sekoitetaan palamiseen tarvittava happi. Polttimet sijoitetaan tulipesän seinille, nurkkiin tai kattoon.

Erityisesti hiiltä käytettäessä on tällä polttotekniikalla syntyvien päästöjen ja lämpöpintojen likaantumisen hallinta vaikeaa, johtuen hiilen suuresta tuhkamäärästä ja rikkipitoisuudesta. Kuitenkin nykytekniikalla päästään varsin pieniin päästömääriin.

Tämän työn suorittamisen yhteydessä kävimme tutustumassa yhdessä työn valvoja Mikko Heikkisen kanssa Haapavedellä sijaitsevaan maailman suurimpaan turpeen pölypolttoon erikoistuneeseen lauhdevoimalaitokseen, jonka lämpöteho on 390 MW ja sähköteho 150 MW.

4.4. Yleistä leijukerrospoltoista

Leijukerrospoltto on suhteellisen uusi polttotapa arina- ja pölypolttoon verrattuna. Ympäristönäkökohtien korostuminen on lisännyt kiinnostusta leijukerrospoltoa kohtaan. Leijukerrospoltto on vallannut alaa arinapolttoon perustuvilta kattiloilta.

Leijukerrostekniikan ensimmäiset energiasovellukset toteutettiin 1970-luvulla. Leijukerroskattilan poltonhallinnan tärkein erityispiirre on pedin hallinta. Ilmalla leijutettavan hiekkapedin lämpötila on korkea (750 - 950 °C). Tasaisen palamisen kannalta on oleellista säilyttää pedissä vakaa lämpötila ja leijutus.

Teollisuuden energiantuotannossa leijukattiloiden osuus on viime aikoina merkittävästi noussut. Leijutekniikkaa käytetään pääasiassa erilaisten puuperäisten polttoaineiden sekä prosessilietteiden polttamiseen. Leijupolton tärkeimpinä etuina voidaan pitää mahdollisuutta käyttää erilaisia polttoaineita samassa kattilassa, edullista rikinpoistoa sekä vähäisiä typenoksidien ja palamattomien päästöjä. Myös polttoaineen nopeat ja suuret laatu- ja määrävaihtelut ovat prosessiteknisesti mahdollista hallita.

Polttotekniikalla voidaan hyvin pitää kurissa typenoksidien ja rikkidioksidin synty. Rikkipäästöt saadaan pysymään alhaisina käyttämällä patjamateriaalin joukossa rikkidioksidia sitovia aineita, esim. kalkkia. Typen oksidien päästöt pysyvät alhaisina matalan palamislämpötilan johdosta (750 - 950 °C). Patjan suuren lämmönvarauskyvyn johdosta leijukerros poltossa voidaan käyttää heikkolaatuista ja kostea polttoainetta. Polttoaineen kosteusprosentti voi olla jopa noin 60 %.

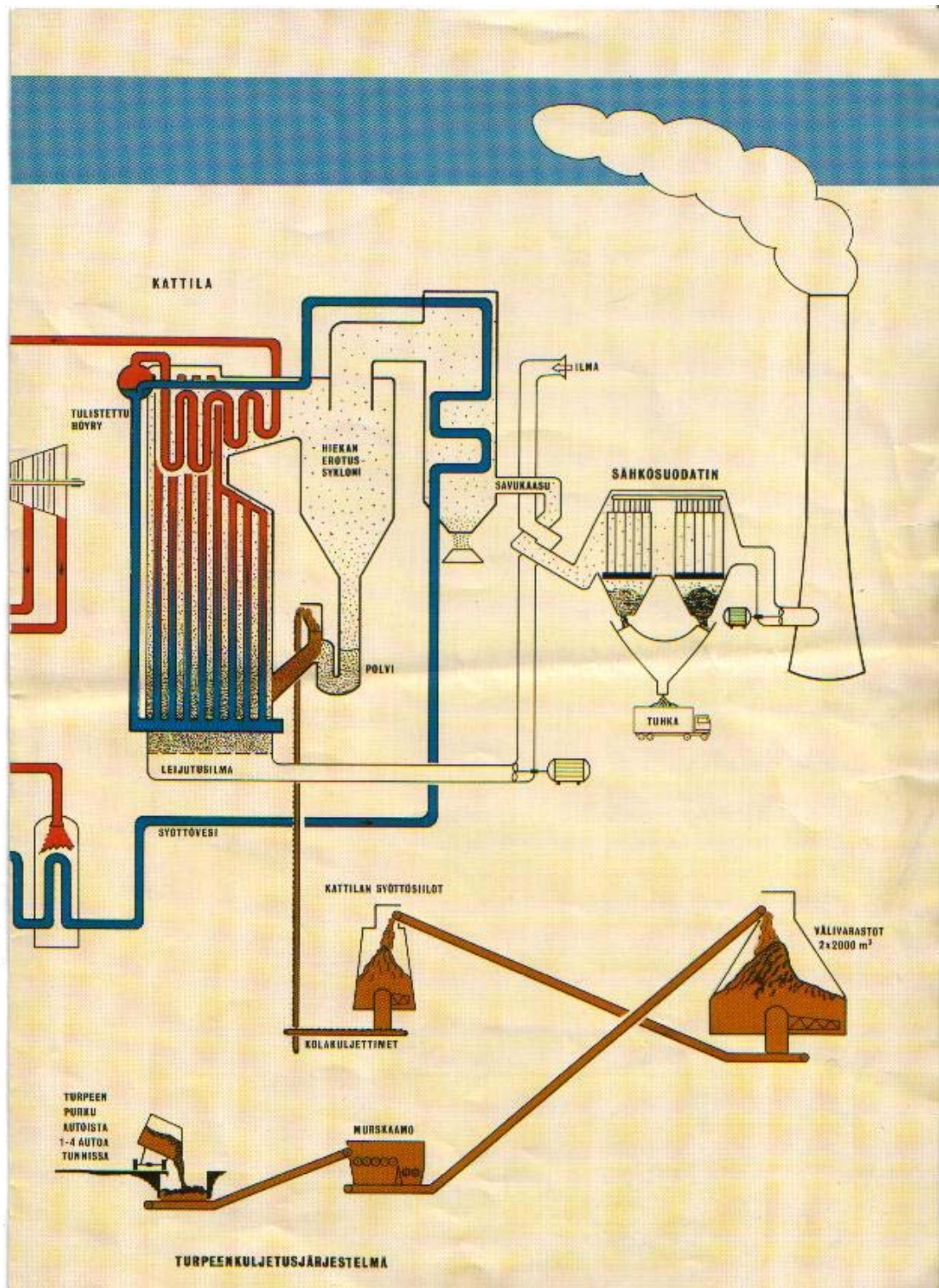
Leijukerros poltto voi tapahtua paineistamattomana tai paineistettuna. Paineistamattomassa leijukerros poltossa lämmönsiirtoaineena käytetään vettä tai höyryä sekä höyryturbiinia sähkön tuottamiseen. Paineistettu leijukerros poltto perustuu paineenalaisten savukaasujen johtamiseen kaasuturpiiniin. Erona on se, että paineistetussa poltossa palaminen tapahtuu 2 - 20 bar paineessa, kun taas paineistamattomassa ilman painetta, yleensä lievässä alipaineessa.[2]

4.5 Polttotekniikka Kainuun Voimalla

Polttoaine tuodaan polttoaineen vastaanottoasemalle, jossa se puretaan kahta purkulinjaa pitkin kahteen välivarastoon (kuva 3). Välivarastoista polttoaine anostellaan ruuvipurkaimilla pitkälle hihnakuuljettimelle, joka syöttää polttoaineen tasaisesti kattilasiiloon. Kattilasiilosta polttoaine puretaan kolakuuljettimilla kuormien mukaisesti kattilaan. Polttoaine syötetään neljän sulkusyöttimen avulla tasaisesti leijuvan patjamateriaalin joukkoon, jossa palaminen tapahtuu.

Paineistamattomassa kiertopetikattilassa polttoaine palaa inertissä, palamattomasta materiaalista koostuvasta patjassa, johon puhalletaan ilmaa alhaalta. Ilma (primääri-ilma) saa polttoaineen ja patjamateriaalin leijumaan. Patjamateriaalina käytetään hiekkaa noin 60 t. Palamishapen määrää säädetään sekundääri-ilmalla.

Voimakkaasta sekoittumisesta ja korkeasta lämpötilasta johtuen polttoaine palaa petiin jouduttuaan nopeasti. Palamaton polttoaine, petihiekka ja turpeen sisältämä hiekka erotetaan kahdessa syklonissa savukaasuista. Tämän jälkeen eroteltu aines palautetaan takaisin petiin. Tästä prosessista johtuu nimitys kiertopetikattila.



Kuva 3. Kainuun Voima Oy:n Kiertopetikattilan periaatekuva

Lentotuhka ja savukaasut jatkavat matkaa ns. takavedon kautta. Savukaasuista otetaan lämpöenergiaa hyötykäyttöön tulistinosalla, ekolla ja luvolla (nuohous-alueet). Savukaasujen lämpötila laskee noin 950 °C:sta noin 135 °C:seen. Tämän jälkeen savukaasujen lämpötila pysyy kutakuinkin vakiona aina savupiippuun saakka. Tämä lämpötila on ns. savukaasujen loppulämpötila.

Luvon jälkeen savukaasut ja lentotuhka kohtaavat sähkösuodattimen. Sähkösuodatin on kolmekammioinen erotinyksikkö. Sähkösuodattimessa hiukkaset varataan sähköisesti. Sähkösuodattimen erotusaste on hyvä, noin 99,5 %. Vastaava hiukkaspitoisuus savukaasuissa sähkösuodatuksen jälkeen on ympäristöluvan mukaisesti alle 100 mg/m³. Tavoitteellinen raja hiukkaspäästöissä Kainuun Voimalla on 50 mg/m³, joka näyttäisi kattilan normaalikäytöllä hyvin pysyvän hallinnassa. Hiukkaset tarttuvat varauspinoille, josta ne tiputetaan ”kolistimilla” tuhkasuppiloihin. Tuhkasuppiloista hiukkaset johdetaan paineilmakuljettimien avulla tuhkasiiloon, josta tuhka puretaan säännöllisin väliajoin kuorma-auton lavalle. Kuorma-auto kuljettaa tuhkan kaatopaikalle.

Sähkösuodattimen jälkeen savukaasut kohtaavat savukaasupuhaltimet. Savukaasupuhaltimien tarkoituksena on säätää kattilan painetta ja puhalttaa savukaasut 100 metriä korkeaan piippuun. Savukaasupuhaltimia on kaksi kappaletta. Kussakin puhaltimessa on 22 kpl muuttuvakulmaisia siipiä, joita ohjataan kattilan tulipesän paineen mukaan. Tulipesän paine pyritään pitämään noin 20 mbar:n alipaineessa. Lisäksi savupiipun alaosassa sijaitsee äänenvaimennin, jonka tarkoituksena on vähentää voimalaitoksessa syntyvää melua. Melun suurimmat aiheuttajat ovat savukaasupuhaltimet, jotka synnyttävät korkeataajuisia ”vinguntaa”.

4.6 Ilmanesilämmitin (Luvo)

Regeneratiivinen ilman esilämmitin siirtää lämpöä varaavien massojen välityksellä. Kylmä ja kuuma massavirta koskettavat vuoron perään samaa, lämpöä siirtävää materiaalia. [3]

Rakenteeltaan ilmanesilämmitin on kuvan 4 mukaan levykennosto. Levykennostot ovat vaihtokelpoisia. Kennoston läpi virtaa vuoroin sitä lämmittävää savukaasua ja vuoroin sitä jäähdyttävää ilmaa (primääri- ja sekundääri-ilma). Levykennot kootaan n. 1 mm paksusta aaltoteräslevystä, joka on emaloitu kylmästä päästä korroosion estämiseksi. Kuumalla puolella kennoelementtejä on 29 kpl ja vastaavasti kylmällä puolella 6 kpl.

Luvon päämitat ovat:

- kokonaishalkaisija 9870 mm
- pyörimisnopeus on 1,5 rpm
- paino noin 100 t
- korkeus 2215 mm

Ilman tasainen jakautuminen lämpöpintojen kesken on tärkeää, koska tasainen lämpötila esilämmittimessä estää paikallisten korroosiopisteiden syntymisen. Pyörivässä luvossa käytetään kanavan ja kennoston välissä elastista tiivistettä, jolla pyritään estämään ilman ja savukaasun sekoittuminen. Luvossa tulee olla palontorjuntalaitteisto, koska lämpöpintoihin tarttuu herkästi palamatonta polttoainetta, joka joutuessaan ilman kanssa tekemisiin saattaa syttyä palamaan [3]. Tulipaloa ei onneksi Kainuun Voiman luvossa ole koskaan ollut.

Ilman esilämmittimessä saadaan talteen keskimäärin vain 10 % savukaasuista kaikkiaan talteen saatavasta energiavirrasta, vaikka luvon lämpöpinta saattaa käsitellä yli puolet koko kattilan lämpöpinnasta. Luvon lämpöpinta on kuitenkin erittäin edullista lämpöpinta-alaa.[3]

Palamisilman esilämmityksellä:

- kuivataan polttoaineista kosteutta
 - tehostetaan polttoaineen syttymistä
 - nopeutetaan palamista
- =>hyötysuhteen paraneminen.

Primääri- ja sekundääri-ilman osuudet palamishapen määrästä on noin 50 - 50. Primääri-ilmalla, jolla saadaan patjamateriaali leijumaan, ei ole kovinkaan paljoa mahdollisuutta säätää palamishapen määrää, koska tulipesässä on oltava vakaa leijutus. Näin ollen primääri-ilman osuus on kutakuinkin vakio ja sekundääri-ilmalla säädetään palamisen tarvitsema happimäärä.



Kuva 4. Kainuun Voiman Luvon kennosto kylmä puoli savukaasukanassa (talviseisokki 2002/2003)

Primääri- ja sekundääri-ilma lämmitetään ennen savukaasuluvoa höyryluvossa. Höyryluvossa lämmitetään savukaasuluvoon menevää palamisilmaa höyryllä. Se pienentää savukaasuilla tapahtuvaa ilmanlämmitystarvetta ja savukaasujen loppulämpötila nousee. Höyryluvoa käytetään, mikäli on vaarana, että savukaasujen loppulämpötila pyrkii laskemaan alle happokastepisteen.

Höyryluvoa käytetään erityisesti pienillä kattilakuormilla, jolloin happokastepiste saattaa alittua, koska savukaasujen lämpötila pyrkii laskemaan. Käytännöllinen höyryluvonohjaus onkin mitata savukaasujen lämpötilaa savukaasuluvon jälkeen, jolloin voidaan säätää höyryluvon tehoa.

4.7 Kattilaveden kiertoperiaate

Käytännössä ainut tuote, jota kattilavoimaloissa valmistetaan, on höyry. Höyryllä pyöritetään turbiinia, jota käytetään sähkön tuotantoon. Höyryllä lämmitetään myös kaukolämpöverkkoa, jos kyseessä on vastapainelaitos. Vastapainelaitoksessa turbiinin välitosta otetaan höyryä lämmönvaihtimiin, joilla lämmitetään kaukolämpöverkkoa. Useasti voimalan vieressä on myös paperitehdas, joka tarvitsee höyryä paperinvalmistusprosessissa.

Kattilaveden on oltava erittäin ”puhdasta”. Niinpä se on jatkuvan tarkkailun alaisena. Kattilaveteen lisätään jatkuvasti eri kemikaaleja. Kemikaalit annostellaan syöttövesisäiliöön. Tärkeimmät mitattavat suureet ovat ph, sähkönjohtokyky ja hapen mittaust.

Kattilaveden kierto on ns. suljettu kierto. Lämmönvaihtimista lauhde palautetaan syöttövesisäiliöön, josta se pumpataan syöttövesipumpuilla kattilaan. Kuitenkin prosessi tarvitsee jatkuvasti lisävettä. Lisävettä kuluu Kainuun Voiman Kattilassa keskimäärin noin 7 kg/s. Lisäveden tarvetta lisäävät ainakin **höyrynuohoimet** ja lieriökattiloissa ns. jatkuva ulospuhallus. Jatkuvan ulospuhalluksen tarkoitus on poistaa kattilavedestä silikaattisuoloja, jotka ovat erittäin haitallisia jouduttuaan turbiiniin ja tulistinosalle. Jatkuvan ulospuhallushöyryn määrä voi olla jopa noin 1 % höyryn tuotannosta. Tämä tarkoittaa esim. Kainuun Voiman kattilassa noin 1 kg/s.

Kattilavesi syötetään syöttövesipumpuilla kattilaan syöttövesisäiliöstä. Syöttövettä lämmitetään kahdella korkeapainelämmönvaihtimella sekä syöttöveden esilämmittimellä (eko). Eko sijaitsee savukaasukanavassa, joka on yksi nuohouskohde.

Ekon avulla saadaan savukaasujen lämpötilaa lasketuksi ja kattilan hyötysuhdetta parannetuksi.

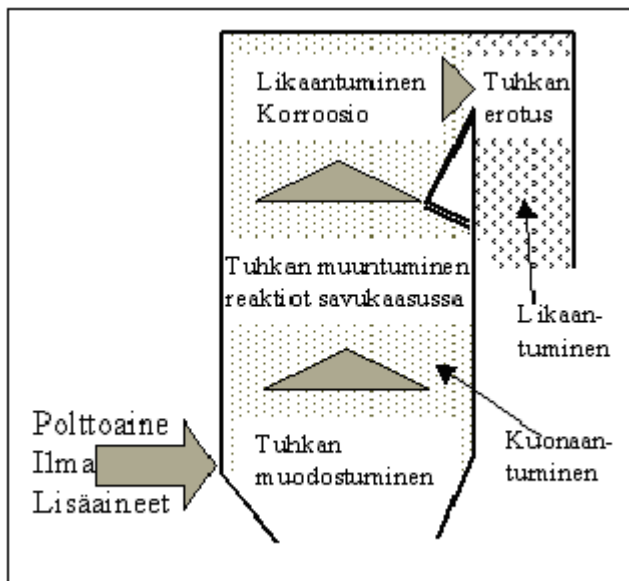
Syöttövesi syötetään tämän jälkeen kattilan yläosassa sijaitsevaan lieriöön ja siitä laskuputkia pitkin kattilan alaosassa sijaitsevaan jakotukkiin. Tämän jälkeen tapahtuu ns. luonnonkiertoilmiö, jossa veden edelleen lämmitessä kattilassa lämmennyt kylläinen höyry ja vesi nousee ylöspäin takaisin lieriöön. Lieriöstä syöttövesi on osittain veden ja osittain höyryn muodossa. Erotus tapahtuu painovoiman avulla. Lieriön yläosasta kylläinen höyry jatkaa matkaansa tulistinosalle, jossa kylläinen höyry tulistetaan. Tulistettu höyry johdetaan turbiiniin ja turbiinin välitosta kahteen lämmönvaihtimeen, joilla lämmitetään kaukolämpöverkkoa.

Paperitehtaalle menevä prosessihöyry alennetaan reduktioventtiilillä 2.5 bar:n paineeseen, jonka lämpötila saadaan pudotetuksi vesiruiskuilla vastaavaan kylläisen höyryn lämpötilaan 135 °C:seen. Paperitehtaalta höyry palautetaan lauhteen muodossa, suodattimien kautta takaisin syöttövesisäiliöön.

5 TUHKAN MUODOSTUMINEN

Tuhkan aineosien vapautuminen riippuu polttoaineesta sekä polttotekniikasta. Suurin osa tuhkaa muodostavista aineista pysyy palavassa hiukkasessa ja muodostaa yhden tai muutaman tuhkahiukkasen. Tuhkan muodostuminen vaihtelee kattilan eri osissa (kuva 5). Lentotuhkan partikkelikoko on noin $< 1\text{ mm}$. [4]

Savukaasupäästöt syntyvät monimutkaisten kemiallisten prosessien tuloksina. Reaktioiden teoreettinenkin hallinta on vielä puutteellista, lisäksi savukaasukomponenttien reaktiot riippuvat toisistaan. Leijukerros poltto kuten muutkin poltto-prosessit on epälineaarinen muuttujaprosessi.[5]



Kuva 5. Tuhkan eri vaiheet kattilassa[4]

5.1 Lämpöpintojen likaantuminen

Tuhkan aiheuttamat ongelmat ovat usein suurin yksittäinen syy kattiloiden ennakkoimattomiin alasajoihin. Palamatta jäänyt tuhka likaa lämpöpintoja.

Lämpöpinnoille:

- tiivistyy höyrystyneitä alkalimetalleja natrium (Na), kalium (K)
- tulistinputkien pinnalle muodostuu tahmea kerros, joka kasvaa nopeasti

- edistävät kattilaputkien syöpymistä (korkealämpötilakorroosio)
- tarttuu sulaa tuhkaa
- törmää tuhkapartikkeleita (eroosio)[4]

Alkalimetallit kuuluvat jaksollisen järjestelmän 1 A - ryhmään. Kaikkein epäjaloimpina metalleina ne reagoivat kiivaasti jopa veden kanssa. reagoidessaan veden kanssa alkalimetallit synnyttävät syövyttävää hydroksidia ja palavaa vetykaasua. [6, s.144]

Kiinteiden tuhkapartikkelien suorasta törmäyskiinnittymisestä ei usein aiheudu suuria ongelmia, koska tällaiset likakerrokset on helppo irrottaa kattilapinnoista. Pinnat on kuitenkin puhdistettava riittävän usein, jotteivät partikkelit ehdi sintraantumalla takertua toisiinsa.[3]

Kattilan kylmemmissä osissa tuhkan ollessa kiinteää muodostuvat kerrostumat lämpöpintoihin tuhkan sintraantumisen seurauksena. Ensin tuhkaa kasaantuu lämpöpintoihin ja ellei sitä poisteta, alkaa se löysässä kerrostumassa kovettua eli sintraantua. Sintraantumalla muodostuvan kerrostuman ominaisuuksiin vaikuttaa tuhkan koostumuksen lisäksi partikkelin koko, lämpötila, aika ja ympäröivän savukaasun koostumus. Sintraantuneiden kerrostumien poistaminen lämpöpinnoista on huomattavasti vaikeampaa kuin irtonaisen lentotuhkan[3].

Ainoa keino miten sintraantumiseen voidaan helpoiten vaikuttaa on aika. Tässä juuri ääninuohoimien ominaisuudet tulevatkin parhaiten esille, koska nuohoustauon pituus on halutessa todella lyhyt. Näin ollen tuhkerokksen kovettumista ei kovinkaan helpolla pääse tapahtumaan.

Likakerrokset heikentävät lämmön siirtymistä savukaasuista jäähdyttävään ainevirtaan. Lika myös huonontaa lämmönsiirtimeen lämmönläpäisykerrointa ja tietyn lämpötehon siirto vaatii suuremman lämpöpinnan. Lisäksi paksut likakerrokset aiheuttavat kattilassa virtausvastuksia savukaasuille. Lämmönsiirtimien (eko, luvo)

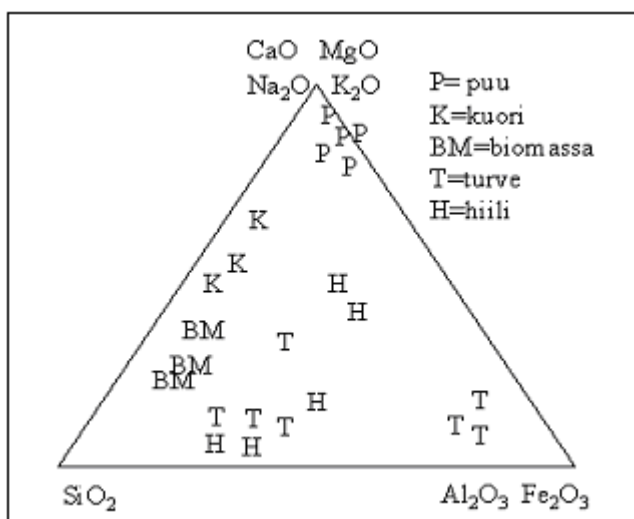
painehäviöitä tai savukaasun loppulämpötilan nousua voidaankin pitää merkinä lämmönsiirtimien likaisuudesta ja nuohoustarpeesta.[3]

Polttoaineen sisältämä kosteus vaikuttaa myös tuhkan tarttuvuuteen. Mitä kosteampaa tuhka on sitä helpommin se tarttuu lämpöpinnoille ja irrotessaan tukkii tuhkan käsittelylaitteita. Näin ollen höyrynuohoimet eivät ainakaan edesauta tätä ongelmaa.

Likaantumisen johdosta savukaasujen virtausvastus kasvaa oleellisesti. Näin ollen savukaasupuhaltimien tehontarve kasvaa. Kattila voi jopa käyttäytyä eri tavalla, jos likaantuminen on huomattavaa. Tämä saattaa aiheuttaa kattilassa enemmän painevaihteluita, koska vapaa savukaasuvirtaus on likaantumisen johdosta osittain estynyt. Tämä voi aiheuttaa ylimääräistä kattilan ”huojuntaa”, jossa kattilan seinämät pullistelevat painevaihtelun johdosta. Näin ollen huojunta saattaa rasittaa kattilan rakenteita esim. liitostappeja kattilan nurkissa.

5.2 Tuhkaa muodostavat aineosat eri polttoaineissa

Tuhkaa muodostavien aineosien osuus vaihtelee suuresti eri polttoaineilla (kuva 6). Puun tuhka sisältää pääasiassa alkali- ja maa-alkalimetalleja, kun taas hiilen ja turpeen tuhka sisältää piitä, alumiinia ja rautaa. Biomassassa on paljon piitä.



Kuva 6. Erityyppisten tuhkien koostumus[4]

6 LÄMPÖPINTOJEN KORROOSIO JA EROOSIO

6.1 Rikkihappokorroosio

Rikkihappokorroosiota esiintyy kattilan loppupäässä, eli ilman esilämmittimestä (**luvo**) aina savupiippuun saakka. Kattilan loppupäällä tarkoitetaan kattilan sitä osaa, jossa savukaasuista saatava lämpöenergia on saatu käytettyä kokonaan hyötykäyttöön, jolloin savukaasujen lämpötila pysyy kutakuinkin vakiona, aina savupiippuun saakka.

Rikkihapon synnylle otollisimmat paikat ovat lämpöpinnat, joiden lämpötila laskee alle 200 °C:n. Rikkihappohöyry muodostuu tässä lämpötilassa, mutta ei jää lämpöpinnoille, ennen kuin lämpötila laskee alle happokastepisteen. Happokastepisteellä tarkoitetaan lämpötilaa, jolloin ensimmäiset happopisarat tiivistyvät lämpöpinnoille. Korroosio alkaa, kun happokastelämpötila on alitettu (n. 150 °C) ja happopisarat ovat alkaneet tiivistyä pinnalle. Mikäli savukaasuissa on läsnä rikkiatrioksidia (SO_3), niiden vesihöyry tiivistyy paljon vesikastepistettä korkeammassa lämpötilassa muodostaen rikkiatrioksidin kanssa rikkihappoa ja hapettavia kalvoja. [3]

Savukaasujen kylmän puolen korroosiota on suomessa tutkittu hyvin vähän. VTT:llä tutkimukset ovat lähinnä painottuneen kuumanpuolen (tulistinalue korroosioon) [13]. Teoreettisesti savukaasujen loppulämpötilan määrittäminen on hankalaa. Näin ollen saattaa olla ”vaarana”, että voimalaitoksissa savukaasulämpötilat pidetään korroosio pelon vuoksi liiankin korkealla.

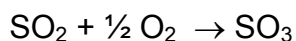
Korroosio ongelmaa on havaittavissa Kainuun Voiman luvossa. Mikäli uudet ääninuohoimet eivät tarpeeksi helpota ongelmaa, voidaan miettiä savukaasujen loppulämpötilan nostoa ainakin ajoittain. Savukaasujen lämpötilan nosto pitää tehdä harkiten, koska tällöin kattilan hyötysuhde heikkenee, koska lämpöenergiaa menee kuumien savukaasujen mukana hukkaan. Vastapainelaitoksissa kaikista suurin tekijä hyötysuhteen laskulle onkin savukaasujen mukana hukkaan mennyt lämpöenergia, joka on suoraan verrannollinen savukaasujen loppulämpötilaan.

Savukaasujen loppulämpötilan laskeminen summamutikassa voi olla huomattavasti vaarallisempaa, kuin sen nostaminen. Savukaasun loppulämpötilaa määrittäessä tulee olla edes jonkinlainen käsitys savukaasujen koostumuksesta. Tärkeimmät savukaasujen komponentit mitkä vaikuttavat rikkihappokorroosioon ovat vesi- ja rikkiatrioksidipitoisuus (SO_3). Savukaasujen vesipitoisuuteen ei juuri-kaan voida vaikuttaa, mutta rikkioksidien pitoisuuden voidaan.

Savukaasujen rikkiatrioksidin määrään ehkä helpoiten voidaan vaikuttaa rajoittamalla yli-ilmanmäärää. Liiallinen yli-ilman rajoitus kuitenkin lisää häkäpäästöjä (CO), koska polttoaineen sisältämä hiili ei reagoi täydellisesti hapen kanssa muodostaen (CO_2). Näin ollen tämä lisää häkäpäästöjä sekä heikentää hyötysuhdetta, koska polttoaineen sisältämästä hiilestä ei vapaudu energiaa haluttua määrää.

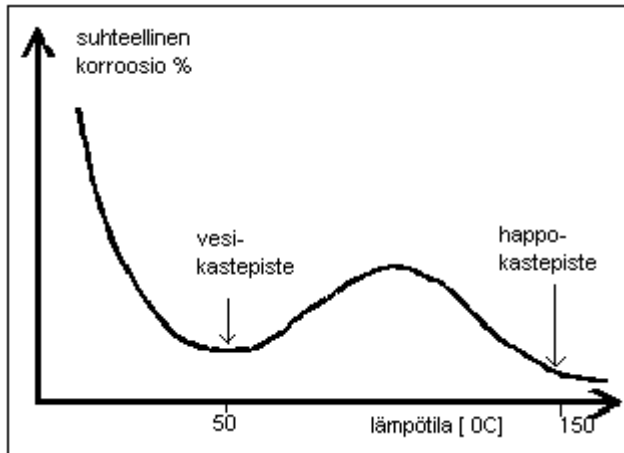
Korroosio on sitä voimakkaampaa (kuva 7), jos alitetaan vesikastepiste (n. $50\text{ }^\circ\text{C}$). Tällöin savukaasujen rikkidioksidipitoisuuden vuoksi muodostuu rikkihapoketta, joka korrodoi terästä huomattavasti ankarammin kuin samanvahvuinen rikkihappo.

Rikkioksidien ja rikkihapon muodostus:

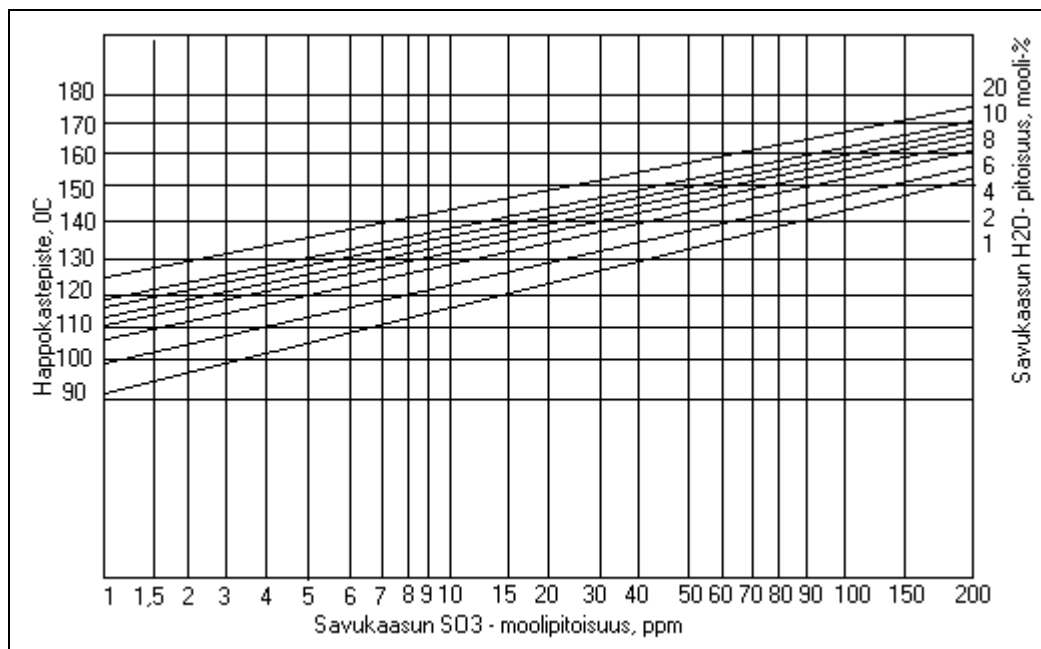


Rikin palaessa syntyy rikkioksidia. Pieni osa siitä hapettuu edelleen kattilassa rikkiatrioksidiksi (SO_3), joka edelleen savukaasuissa olevan veden kanssa muodostaa rikkihappoa (H_2SO_4).

Yleensä polttoaineen sisältämälle kosteudelle ei voida tehdä juuri mitään. Polttoaine on koostumukseltaan Kainuun Voiman kattilassa hyvinkin kostea. Kuvan 8 mukaan ollaan hyvin lähellä ylimmäistä käyrää, joka kuvaa savukaasun H_2O -pitoisuutta.



Kuva 7. Savukaasulämpötilan vaikutus happokorroosionopeuteen[4]



Kuva 8. Happokastepisteen riippuvuus savukaasujen SO_3 - ja H_2O - mooliosuuksista [3]

6.2 Savukaasulämpötilan merkitys rikkihappokorroosioon

Matalalämpötilakorroosiota voidaan torjua säätämällä savukaasujen lämpötila riittävän korkealle. On kuitenkin huomioitava, että kattilan hyötysuhde laskee savukaasulämpötilan noustessa. Jokaisessa voimalassa savukaasujen lämpötila määritellään, osittain kokemuspärisesti ja osittain laitevalmistajien suosituksien mu-

kaan. Lämmönvaihtimissa ja savukaasukanavissa käytetyt materiaalit ratkaisevat myös sallitut savukaasulämpötilat.

Kainuun Voimalla savukaasujen loppulämpötila on kokemusperäisesti määritelty noin 135 °C:seen. Joitakin vuosia sitten Kainuun Voimalla kokeiltiin savukaasujen loppulämpötilan laskua huonolla menestyksellä. Lämpötila laskettiin noin 115 °C:seen, ja siitä seurauksena oli, että savupiipun alahelma rupesi syöpymään todella voimakkaasti. Tällaisia huomattavia savukaasun lämpötilan muutoksia ei pitäisi ”summassa” tehdä, koska siitä seurauksena voi olla huomattavia kustannuksia, kuten tässäkin tapauksessa.

Lämmönsiirtimen kestävyysden vuoksi savukaasujen loppulämpötila pyritään pitämään happokastelämpötilaa korkeampana eli:

- hiilenpoltossa 120 - 150 °C
- teollisuuden ja yhdyskuntien jätteiden poltossa 130 - 150 °C
- öljypoltossa 140 - 160 °C
- maakaasupoltossa 100 - 120 °C [3].

Mitä enemmän savukaasuissa on vesihöyryä tai rikki- ja rikkidioksidia, sitä korkeampi on happokastepiste. Käytännössä ei kuitenkaan tiedetä, kuinka paljon savukaasujen rikkidioksidista hapettuu rikki- ja rikkidioksidia, joten kuvan 8 käyrästön käyttö happokastepisteen määrittämiseen on vaikeaa. Jotta vältetään kattilan kylmimmän osan lämpöpintojen (yleensä luvo) syöpyminen, tulee varmistaa, ettei happokastepistelämpötila alitu missään kohdin.[3]

Savukaasujen loppulämpötilan määrittäminen Kainuun voiman kattilassa on hankalaa, koska polttoaineen laatuvariaatiot ovat suuria (rikki- ja vesipitoisuus). Tilanne on aivan toinen sellaisilla kattiloilla, joissa polttoaine on samaa ja tasalaatuista, esim. hiilen ja turpeen pölypoltto.

Kuitenkin voisi olla järkevää säädellä savukaasujen loppulämpötilaa, koska happokastepisteen lämpötila muuttuu hyvinkin paljon eri polttoaineilla (kuva 8). Tätä kautta on mahdollista saavuttaa huomattaviakin säästöjä, johtuen korroosion vähenemisestä ja mahdollisesta hyötysuhteen noususta. Savukaasulämpötilaa voidaan alentaa, tai nostaa tietyillä hetkillä (höyryluvon tehonsäätö). Näin ollen ei mielestäni ole järkevää pitää savukaasujen lämpötilaa aina vakiona 135 °C:ssa. Savukaasujen loppulämpötilaa kannattaisi nostaa ainakin silloin, kun ajetaan kattilaa märällä turpeen ja kuoren sekoituksella, sekä jos samanaikaisesti joudutaan ajamaan hiiltä ns. ripotteluteholla, jolloin hiiltä ajetaan n. 2 kg/s. Yleensä kattilaan ei enempää normaalitilanteessa hiiltä ajeta, mutta häiriötilanteissa voi hiiltä kulua n. 2 - 16 kg/s. Näin ollen on perusteltua nostaa savukaasulämpötilaa, kun tiedetään, että vesipitoisuus pysyy korkeana ja rikkiatrioksidipitoisuus nousee, koska hiilen poltosta vapautuu rikkioksideja johtuen hiilen rikkipitoisuudesta. Lisäksi yli-ilmamäärä pitää kuitenkin olla märillä polttoaineilla suhteellisen korkea, joten rikkidioksidia varmasti hapettuu rikkiatrioksidiksi mitä suuremmissa määrin.

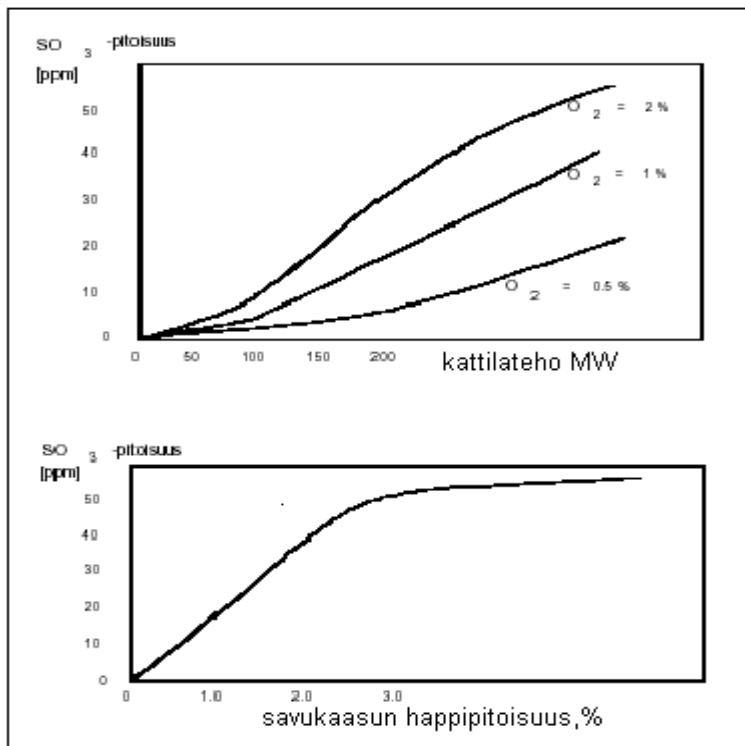
6.3 Palamishapen merkitys korroosioon

Olisi tärkeää hankkia mahdollisimman nopeasti kiinteä CO-mittaus savukaasukanavaan, koska tällä hetkellä palamishapen ohjaus kattilaan on aikailla ”mutu”-tuntumalla tapahtuvaa. Näin ollen pystyttäisiin tehokkaasti rajoittamaan yli-ilmamäärää seuraamalla CO-pitoisuuden nousua (CO-pitoisuus nousee jyrkästi, jos yli-ilmamäärää rajoitetaan liikaa). Tällä tavalla voitaisiin rajoittaa rikkidioksidin hapettuminen edelleen rikkiatrioksidiksi, joka edelleen muodostaa veden kanssa rikkihappoa. Toinen tärkeä hyöty olisi savukaasumassavirtauksen pienentyminen, joka parantaisi hyötysuhdetta. Tärkeä tekijä on hallita palaminen tulipesässä oikealla tavalla. Polton hallinnan tärkeitä tekijöitä ovat polttoaineen tasainen syöttö tulipesään ja palamishapen ohjaus [12]. Lisäksi on **tärkeää** polton kannalta saada sekundääri-ilma tulipesään siten, että koko tulipesän alueella palaminen olisi tasaista.

Yli-ilmamäärällä (palamishappi) on myös merkitystä rikkiatrioksidin synnyn määrään. Rikkiatrioksidien muodostumiseen voi lähinnä vaikuttaa vain yli-ilmamäärää rajoittamalla (kuva 9).[7]

Kuitenkin palamattomien polttoaineiden sekä CO-päästöjen (häkä) määrä vastavasti kasvaa, jos palamishapen määrä on pieni (palaminen epätäydellistä). Tämä voi aiheuttaa päästö- ja kuonaantumisongelmia. Palamishapen määrä pitäisi osata hallita siten, että täydellisen ja epätäydellisen palamisen rajat olisivat mahdollisimman lähekkäin.[5]

Yli-ilmamäärällä tarkoitetaan sitä happipitoisuutta savukaasukanavassa, joka ei ole osallistunut palamisreaktioon. Turhan suuri yli-ilmamäärä huonontaa kattilan hyötysuhdetta ja lisää rikkiatrioksidin määrää savukaasuissa (kuva 9). On myös tärkeää, että yli-ilmanmäärän mittaus suoritetaan ennen luvoa, koska luvosta vuotaa ilmaa jatkuvasti savukaasukanavaan (n. 2 % pyörivissä luvoissa). Näin saadaan luotettava mittatulos, jotta voidaan ohjata palamishapen määrää.



Kuva 9. Happylimäärän vaikutus SO₃:n muodostukseen [7]

Parhaaseen kattilahyötysuhteeseen voidaan päästä, jos savukaasukanavassa on happiylimäärä- ja CO-mittaus. Kainuun Voiman kattilassa ei vielä CO - mittaus ole, mutta vuoteen 2004 mennessä uuden lain mukaan on oltava. Jos kummatkin mittaukset ovat olemassa, voidaan yli-ilmanmäärää rajoittaa tehokkaasti seuraamalla CO-pitoisuuden nousua. Näin voidaan pyrkiä parhaaseen hyötysuhteeseen. Tätä kautta voidaan harkita jopa savukaasun loppulämpötilan alentamista, koska rikkiatrioksidipitoisuus voidaan saada alenemaan huomattavankin paljon.

6.4 Kalkin syöttö

Mielestäni tulisi vakavasti harkita kalkkilinjan käyttöönottoa, koska sellainen on laitoksella valmiiksi olemassa. Näin ollen voitaisiin vähentää rikkidioksidin määrää savukaasuissa sekä vähentää päästöjä ilmastoon. Laitoksen rikkipäästöt ovat kuitenkin vuositasolla huomattavia (mittausten mukaan n. 600 t/a, mikä on tehty keskimääräisellä polttoaine seoksella). Vähentynyt rikkidioksidin määrä vastaavasti vähentää rikkiatrioksidin määrää, koska kalkin kanssa reagoinut rikkidioksidi ei enää hapetu rikkiatrioksidiksi. Myös tätä kautta voi olla ehkä mahdollista, jopa laskea savukaasujen loppulämpötilaa. Lisäksi on selvästi havaittavissa voimalaitokselta tuleva rikin haju, jos tuulet ovat suotuisat. Tästä asiasta ovat jotkut kirjoittaneet jopa paikalliseen sanomalehteenkin.

Taloudellisesta näkökulmasta katsottuna ei välttämättä ole edullista käyttää kalkkilinjaa jos vain ympäristövaatimukset tulevat täytetyiksi. Tulevaisuudessa ympäristönäkökohtien tiukentuessa voi olla, että kalkkia joudutaan syöttämään kattilaan rikkipäästöjen eliminoimiseksi. Tämä kysymys on osittain eettinenkin. Mielestäni rikkidioksidi päästöjä tulisi rajoittaa, koska se on kuitenkin suhteellisen helposti järjestettävissä ko. kattilassa. Vaikka päästörajat eivät ylittyisikään. Tästä voisi olla hyötyä myös yrityksen imagolle, koska näin voidaan puhua ainakin jossain mielessä puhtaasta energian tuotannosta.

Leijukerrospolttoa pidetään myös rikkipäästöjen torjuntatekniikkana. Edellytyksenä kuitenkin on, että leijutusmateriaalin joukossa käytetään rikkidioksidia sitovia aineita, esim. kalkkia. Kalsiumkarbonaatti (CaCO_3) hajoaa palaessaan kalsiumoksidiksi (CaO) ja hiilidioksidiksi (CO_2). Kalsiumoksidi reagoi rikkidioksidin (SO_2) ja hapen (O_2) kanssa, ja näin syntyy kalsiumsulfaattia (CaSO_4). Kalsiumsulfaatti ja tuhka poistetaan sähkösuodattimessa. On huomioitava, että reaktio kuluttaa hapetta, joten olosuhteet tulipesässä on oltava hapettavat \Rightarrow sekundääri-ilmamäärän tarve kasvaa. Myös kiintoainepäästöt kasvavat savukaasukanavaan. Kiintoainepitoisuuden kasvu kuormittaa ainakin sähkösuodatinta ja tuhkan käsittelylaitteistoja.

Kainuun Voimalla ei ole ollut ainakaan vielä ongelmia asetettujen rikkidioksidipäästöjen kanssa, joten kyseistä kalkkilinjaa ei ole tarvittu käyttää. kalkkisyöttöjärjestelmän hallinta on osoittautunut varsin ongelmalliseksi. Syntynyt kalsiumsulfaatti tukkii herkästi lämmönvaihtimia ja kalkin syöttö on ongelmallista. On kuitenkin havaittavissa, että tulevaisuudessa rajoitetaan ainakin hiilidioksidipäästöjä (kasvihuonekaasu), mikä ”sotii” kalkkisyöttöä vastaan, koska osa kalkista hajoaa juuri hiilidioksidiksi.

Haapaveden voimalaitoksella kokeiltiin kalkin syöttöä rikkipäästöjen vähentämiseksi. Tuloksena oli luvon tukkeutuminen useaan kertaan, mikä aiheutti tarpeettomia seisokkeja ja lopuksi luvon kylmän pään kennoston vaihdon. [8]

Kainuun Voiman kattilassa ei pitäisi samaa vaaraa olla kuin Haapaveden turvekattilassa. Tämä johtuu tulipesän alhaisemmasta lämpötilasta ja kattilan rakenteesta.

Kiertopetiteknikalla täytetään rikinpoistovaatimukset Ca/S -moolisuhteella 1,5–2,0, kun leijupetiteknikka edellyttää moolisuhdetta 2,0–3,0. Suurelta osalta tämä johtuu siitä, että kiertopetiteknikassa reagoimaton kalsium palautetaan tulipesään kattilassa olevan syklorin avulla. Reaktion onnistumiseksi on oleellista, että kalkin

hiukkaskoko on oikea, ei liian suuri eikä liian pieni. Suuret hiukkaset poistuvat kattilasta pohjatuhkan mukana ehtimättä reagoida, ja liian pienet hiukkaset puolestaan poistuvat savukaasujen mukana erottumatta sykloneissa. Näin myös syklonin erotusaste vaikuttaa kalkin kulutukseen. Siihen vaikuttaa myös se, kuinka hyvin syötetty polttoaine ja kalkki saadaan sekoittumaan keskenään.[3]

Työn tilaajan kiertopetikattilassa tämä tarkoittaa sitä, että kalkkikiven sisältämää kalsiumia (Ca) on ainemääränä (mooleina) syötettävä noin kaksi kertaa enemmän verrattuna polttoaineen sisältämään rikkiin (S). Olisi tärkeää myös osata hallita kalkin syöttö juuri oikeaan aikaan tulipesään silloin, kun tiedetään polttoaineen sisältävän rikkiä (turve, hiili). Yksi keino voisi olla kalkin syöttäminen polttoaineen joukkoon, jolloin kalkin ja polttoaineen sekoittuminen tulipesässä olisi varsin tasaista.

Ca:n suhteellinen kaavamassa saadaan laskettua, kun luetaan alkuainetaulukosta CaCO_3 :n sisältämät alkuaineiden painot:

- Ca = 40,1 g/mol
- C = 12 g/mol
- O = 16 g/mol

Lasketaan Ca:n massaprocentti CaCO_3 :sta prosenttikaavalla

$$\frac{40,1}{(12 + 16 \cdot 3 + 40,1)} 100\% = 40\%. \quad (1)$$

Nyt kun tiedetään polttoaineen sisältämän rikin määrä niin voidaan laskea tarvittava kalkin määrä (CaCO_3), kun kerrotaan Ca:n määrä kaavalla 1 lasketulla suhteella. Nämä määrät on laskettu valmiina liitteessä C. Digitaalisessa muodossa laskentataulukolla voidaan määrittää polttoaineen mukaan tarvitsema kalkkimäärä helposti.

6.5 Savukaasulämpötilan noston vaikutukset

Mielestäni savukaasujen loppulämpötilaa kannattaisi ainakin hetkellisesti nostaa silloin kuin joudutaan ajamaan, esim. hiilellä ja märällä kuori/turveseoksella. Tällöin savukaasujen veden- ja rikkiatrioksidin pitoisuudet (ppm) saattavat kasvaa huomattavasti. Näin ollen happokastelämpötila nousee korkeammaksi ja nostaa rikkihappokorroosion vaaraa luvosta aina savupiippuun saakka.

Polttoaineen laadun vaihtelu voi olla kattilassa huomattavaa. Suurimmat korroosioon vaikuttavat tekijät ovat vesi ja rikkipitoisuus. Tällöin happokastepistelämpötila vaihtelee. Näin ollen savukaasujen loppulämpötilaa ei ehkä ole järkevää pitää aina samalla tasolla (n.135 °C). Toisin on sellaisissa kattiloissa, joissa polttoaine on tasalaatuista ja saamaa esim. Haapavedellä sijaitseva Fortumin turvekattila.

Jos savukaasujen loppulämpötilaa nostettaisiin esim. 10 °C:sta (135 °C:sta 145 °C:een) ja oletetaan hyötysuhteen tippuvan noin 0,5 % (20 °C :sta vastaa noin 1 % hyötysuhteen laskua [3]). Kattilaenergi hinta on 9,78 €/MWh, ja kattilateho 240 MW (0,5 %:n hyötysuhteen lasku, vastaa täydellä kattilakuormalla 1,2 MW). Tästä seuraava rahallinen häviö kaavalla 19 laskettuna, olisi noin 13 €/h. Tällä menetelmällä voisi olla mahdollista saavuttaa merkittäviäkin säästöjä pitkällä tähtäimellä. On myös huomioitava, että savukaasujen loppulämpötilan nosto lisää tietysti höyryluvon tehontarvetta ja myös sitä kautta kustannuksia. Rikkihappokorroosion vaara on ainakin luvossa, sähkösuodattimessa, äänenvaimennin ja savupiippu. Myös savukaasukanavat ja tuhkalähtetimetkin voivat olla vaarassa.

Savukaasun loppulämpötilan noston voisi tehdä siten, että kun hiilikuljetin pyörii niin siitä tulisi tieto esim. höyryluvon tehonsäädölle. Hiilikuljettimen pyörimisnopeus on suoraan verrannollinen käytetyn hiilen määrään. Savukaasujen loppulämpötilan nosto voisi olla välillä 5 - 10 °C. Lämpötilaa voitaisiin nostaa 5 °C:sta kun hiililinja on ns. ripotteluteholla jolloin hiilen kulutus on noin 2 kg/s. Ja siitä lineaarisesti aina 10 °C:een saakka verrattuna hiilikuljettimen maksimi pyörimisnopeuteen.

Ulkolämpötilan vaikutus on myös tärkeä huomioida savukaasujen lämpötilan nostona. Savupiippu ja äänenvaimennin sijaitsevat ulkona betonisen liukuvalupiipun sisällä. Näin ollen lämpötila kovilla pakkasilla saattaa laskea materiaalin pinnassa haitallisen alhaiseksi. Tällöin on vaarana kosteuden tiivistyminen (kondensio) tällä savupiipun alueella. Olisi tärkeää, että tämän kaltainen tilanne voitaisiin välttää etukäteen, eikä silloin kuin vesi on jo päässyt tiivistymään, koska tällöin metallin syöpyminen voi olla todella nopeaa.

Tässä tapauksessa näyttääkin siltä että juuri savupiippu onkin kaikista herkin korroosiolle. Tämän todistaa joitakin vuosia sitten tehty kokeilu, jossa savukaasujen loppulämpötilaa laskettiin Kainuun Voimalla ”summassa” liian alas noin 115 °C:seen. Tämä kokeilu voi olla myös osasyynä luvon kylmän puolen kennoston vaihdolle. Näin rajut savukaasujen loppulämpötilan muutokset ovat vaarallisia, koska rikkihappokorroosio nopeus muuttuu hyvinkin jyrkästi lämpötilan laskiessa (kuva 7). Käytännössä näin alhaiseen savukaasulämpötilaan ei päästä kuin maa-kaasun poltossa.

Yksi käytännöllinen keino voisi olla seurata savupiipun alaosaan tiivistynyttä veden/rikkihapon määrää. Näin ollen kun huomataan tiivistynyttä nestettä savupiipun alaosassa olisi se merkinä kastepisteen alittumiselle. On tietysti tärkeää, että eristeet ovat hyvässä kunnossa varsinkin savupiipun alueella. Savupiipun alaosassa voisi olla veden tunnistimet, joista tulisi hälytys valvomoon. Näin tiedettäisiin, että kastepiste on saavutettu ja siihen osattaisiin reagoida savukaasujen loppulämpötilan nostolla. Tyhjennys voisi olla joko automaattisesti ohjattu magneettiventtiili tai haponkestävä hana. Tällä hetkellä (2003) piipun alaosassa on tyhjennysroppu, jota käydään ehkä pari kertaa vuodessa katsomassa ja tyhjentämässä.

VTT:n tutkia Martti Mäkipää tarjosi käyttööni mittasondia, jonka olisi voinut asentaa esim. savupiipun alaosaan mittaamaan happokastepistettä ja tiivistyneen hapon määrää. Tämä olisi ollut mielenkiintoinen projekti, mutta resurssini eivät tähän

enää riittäneet. He olivat kokeilleet mittausta koelaitoksessa huonolla menestyksellä, koska tuhka oli häirinnyt mittausta liiaksi [10]. Näin ollen olisi tärkeää, että mittaus suoritetaan sähkösuodattimen jälkeen. Ei tästä sen enempää, mutta tämä voisi olla varsin hyödyllistä tulevaisuudessa.

6.6 Nuohouksen merkitys korroosioon

Höyrynuohouksella on merkitystä korroosioon kattilan savukaasukanavissa, joissa konvektiopinnat ja nuohousalueet sijaitsevat. Korroosion vaarassa ovat alueet, joissa lämpötila laskee alle happokastepisteen. Riskialue on nuohouksen osalta luvo. Tämä on yksi suurimmista syistä, minkä takia juuri luvon kannattaisi asentaa ääninuohoimet. Höyrynuohoimet kostuttavat erityisesti luvon kylmää päätä, koska lämpötilaero on huomattava nuohoushöyryn ja luvon kennostomateriaalin välillä. Höyrynuohoimet sijaitsevat savukaasukanavassa siinä kohden, missä luvon kennosto juuri palaa sekundääri- ja primääri-ilmakanavasta (kuva 17). Näin ollen kylmä ilma (primääri ja sekundääri) on jäähdyttänyt kennostomateriaalin hyvinkin alhaiseen lämpötilaan.

Keskustelimme Imatran Hitsauspalvelun Kari Kinnin kanssa, joka on käytännössä viime vuodet vastannut Kainuun Voiman luvon huollosta. Hän oli sitä mieltä, että nuohoimilla on suurehko merkitys luvon kylmänpään kennojen korroosioon. Heidän yritys vaihtoi luvon kennoston kylmään päähän vuonna 1999. Jo muutaman käyttövuoden jälkeen on korroosioaurioita näkyvissä kennoston alareunassa (kuva 3). [9]

On tietysti hankala määritellä, kuinka paljon höyrynuohouksella on osuutta korroosioon luvon kohdalla. Keskustelimme VTT:n tutkija Martti Mäkipään kanssa korroosion ja höyrynuohoimien yhteydestä. Hän oli myös sitä mieltä, että höyrynuohoimet lisäävät korroosiota kattilassa, koska ne lisäävät savukaasujen vesipitoisuutta [10]. Näin ollen tuhkan kasteus nousee, mikä lisää jonkin verran korroosiota tuhkalähettimissä, sähkösuodattimessa ja savupiipun alueella.

6.7 Polttoaineen merkitys korroosioon

Savukaasujen koostumus voidaan määrittää kun tiedetään polttoaineiden sisältämät eri komponentit. Tästä voi olla apua, jos halutaan saada selville savukaasujen vesi- ja rikkidioksidipitoisuudet ja sitkautta määrittää savukaasujen loppulämpötilaa. Tässä tapauksessa kun tiedetään pääpolttoaineiden olevan turve ja puu/kuori jäte, niin polttoaineen eri komponentit ja mooliosuudet voidaan taulukoida esim. excel- ohjelmaan (liite C). Liitteen C:n laskut perustuvat lähteiden 3 ja 6 tietoihin.

Eri komponenttien %-mooliosuudet saadaan jakamalla halutun komponentin mooliosuus koko savukaasujen mooliosuudella ja kerrottuna tulos 100%:lla. Valmis taulukko liitteenä C. Taulukoidut arvot käsittää ns. täydellistä palamista jossa ilma-kerroin on 1. Todellisuudessa esim. hapen- ja typen osuudet on jonkin verran korkeampi, mutta taulukon mukaan saadaan suuntaa-antavat pitoisuudet selville varsin tarkasti.

Ilmakerroin voidaan määrittää kaavalla

$$\lambda = \frac{21}{(21 - O_{2mitattu})}. \quad (2)$$

- $O_{2mitattu}$ = happimäärä savukaasukanavassa, %
- λ = ilmakerroin.

Ainemäärät saadaan laskettua kaavalla

$$m = n \cdot M. \quad (3)$$

- m = massa (g)
- n = ainemäärä (mol)
- M = moolimassa (g/mol)

Polton häiriöistä arviolta 90 % johtuu polttoaineesta. Polttoaineen laatu tai epäta-sainen virtaus tulipesään aiheuttaa polttoon vaihtelua. Yleensä kattila itsessään tai ilmajärjestelmä toimii kuten on suunniteltu, mutta polttoaineen syöttö kattilaan on häiriöllistä. Leijukerros-poltossa polttoaineen syötön tasaisuus korostuu, koska polttoaine palaa nopeasti pedissä. Nopeat kuorman muutokset ja epäsymmetrinen palaminen kasvattavat päästöjen tasoa ja huonontavat polton hyötysuhdetta.[5]

Kaikkein yksinkertaisin rikkipäästöjen torjuntatekniikka on, vähentää sellaisien polttoaineiden käyttöä, jotka sisältävät rikkiä. Tämä keino on hankala toteuttaa, esim. hiilen pölypoltossa on mahdoton käyttää muita polttoaineita. Kuitenkin hiilel-läkin on eri ominaisuuksia ja se voi olla koostumukseltaan erilaista.

6.7 Eroosio

Kattilan eroosiolla tarkoitetaan savukaasuissa olevien pienten, kovien hiukkasten aiheuttamaa kulumista. Eroosionopeuteen vaikuttavat törmäysnopeus, törmäys-kulma, partikkelien massa ja sisäinen kokojakauma, konsentraatio, kovuus, putki-materiaalien ominaisuudet jne. [3]

Eroosiota ei pidetä yhtä vaikeana ongelmana kuin korroosiota, ellei polttoaine si-sällä runsaasti kuluttavia partikkeleja, kuten turve. Turpeessa ja turpeen tuhkassa on huomattavasti kuluttavia, kovia kvartsiyhdisteitä. Siksi polttolaitteiden suunnitte-lussa tulee ottaa huomioon voimakas eroosio.[3]

Leijukerroskattossa eroosiota voidaan pitää vakavana ongelmana. Erityisesti kiertopetikattilassa eroosio on huomattavaa. Tämä johtuu patjamateriaalin ja polttoaineen suuresta virtausnopeudesta tulipesässä. Osa patjamateriaalista ja polttoaineesta liikkuu tulipesässä seinämiä pitkin kuluttaen kattilaputkistoja. Seinämät ovat kauttaaltaan kattilaputkistoa täynnä, lukuun ottamatta tulipesän alaosaa, joka on suojamuurattu.

Pienten savukaasuissa olevien hiukkasten aiheuttama kuluttava liike voi joissakin tapauksissa olla hyödyllistä. Erityisesti jos konvektiopintojen likaantuminen on samaan aikaan ongelmallista, niin tuhka hiukkaset oikeassa suhteessa puhdistavat lämpöpintoja kuitenkin kuluttamatta niitä liikaa.

Myös **höyrynuohoimien** osuus eroosiossa on mielestäni merkittävä. Nuohouksen aikana nuohoushöyry purkaantuu suuttimista todella voimakkaasti (jopa yli äänennopeudella). Paineinen höyry (24 bar) ja tuhkapartikkelit yhdessä puhdistavat ja kuluttavat lämpöpintoja voimakkaasti ja näin aiheuttavat eroosiota.

7 LÄMPÖPINTOJEN PUHDISTUS

7.1 Yleistä nuohouksesta

Kiertopetikattilassa ei tulipesässä tulipinnoille keräänny tuhkaa eikä nokea. Tämä johtuu polttoaineen ja leijutusmateriaalin liikkeestä kattilassa. Materiaali liikkuu osittain seinämiä pitkin (tulipinnat) samalla puhdistuen niitä liiankin hyvin, jolloin puhutaan haitallisesta eroosiosta. Nuohottavat pinnat sijaitsevat sykloneiden jälkeisissä savukaasukanavissa, missä konvektiopinnat sijaitsevat.

Likaantumisen määrä riippuu kattilan rakenteesta, polttoaineesta, kuorman suuruudesta, tuhkan koostumuksesta ja lämpötilasta. Likaantuminen vaikeuttaa lämmön siirtymistä kattilaveteen ja höyryyn. Tästä seuraa suurempi lämpötilaero savukaasujen ja kattilaveden/höyryn välillä. Näin ollen kohoaa poistuvien savukaasujen lämpötila ja siitä seuraa hyötysuhteen lasku. Tämän vuoksi kattilan konvektiopinnat täytyy pitää mahdollisimman puhtaina. Ainoa puhdistuskeino käynnin aikana on nuohous.

Puhallusnuohoimet puhdistavat lämpöpintaa höyryllä tai ilmalla, yleensä höyryllä, koska sitä saadaan omasta kattilalaitoksesta. Ilmanuohouksen haittana on myös lisäkaasun pääsy konvektiopinnoille, mikä aiheuttaa tarpeettomia painevaihteluja ja tulipalovaaraa. Suomessa ei tietävästi ilmalla nuohota kattiloiden konvektiopintoja, mutta esim. tuhkasiiloissa ilmanuhoimia käytetään paljon.

Nuohousjaksojen pituus ja järjestys määritellään yleensä kattilakohtaisesti seuran avulla. Yleensä pyritään välttämään turhia nuohouskertoja, varsinkin jos kyseessä ovat höyrynuohoimet. Höyrynuohous kasvattaa lisäveden tarvetta, lisää korroosiota ja eroosiota sekä tuhkan kosteutta.

Jos kattilan likaantuminen on ongelmallista, on nuohouskertoja pakko lisätä. Jos näin ei tehdä, saattavat lämmönvaihtimet tukkeutua, josta seurauksena voi olla sei-

sokki. Myös vaikka kuona irtoaisikin helposti, ja nuohoussykli on liian harva, saatavat hiukkaspäästöt kasvaa huomattavan suureksi nuohoushetkellä. Tämä voi aiheuttaa ongelmia sähkösuodattimessa, koska suodatin ei välttämättä ehdi varata tuhka-hiukkasia. Niinpä huomattava osa tuhka-hiukkasista voi päästä savukaasupuhaltimiin, mikä aiheuttaa eroosiota savukaasupuhaltimien siivissä. Myös hiukkaspäästöt ilmastoon voivat kasvaa nuohoushetkellä.

Nuohoushöyry otetaan reductiventtiiliin (paineen alenninventtiili) kautta korkeapainetulistimesta tai suoraan välitulistimesta. Sen paine on 20 - 30 bar ja lämpötila n. 100 °C korkeampi kuin vastaavan kylläisen höyryn, jotta lämpöpintaa vahingoittavat, puhallushöyryssä olevat vesipisarot, eliminoituvat. Nuohoushöyryn lämpötila on noin 300 °C.

Ennen nuohouksen alkua nuohoushöyrylinja vesitetään. Tämä tarkoittaa veden (lauhde) poistamista nuohoushöyrylinjasta, jotta välttyään vesipisaroiden aiheuttamista harmeista. Kun höyryn lämpötila on oikea, päästää venttiili höyryn nuohottavaan kohteeseen.

Jos nuohoin on sijoitettu pieneen kattilaan, on kattilaa ajettava vähintään puolella kuormalla nuohouksen aikana, jotta savukaasuvirtaukset olisivat riittävät. Savukaasupuhallinta on ajettava siten, että sen teho riittää myös nuohousaineelle ja lentotuhkalle. Suuremmissa kattiloissa nämä toimenpiteet eivät ole tarpeen, koska nuohousaineen tilavuus on pieni verrattuna savukaasutilavuuteen.

Nuohousjärjestys on tavallisesti seuraava: tulistinalue, konvektioalue, eko ja luvo. Järjestys on sama kuin savukaasujen virtaussuunta. Käytön aikana saadut kokemukset ratkaisevat kuitenkin lopullisen nuohousjärjestyksen.

Kainuun Voimalla höyrynuohousjakson välin pituus on noin 1 - 2 vrk, riippuen kuormasta. Kuitenkaan tarkkaa ohjeistusta nuohoukselle ei ole olemassa. Nuohous suo-

ritetaan lähinnä ”mutu” -tuntumalla. Tarkan oheistuksen laatiminen on hankalaa johtuen polttoaineen määrän ja laadun voimakkaista vaihteluista.

Sellaisen kattilavoimalan höyrynuohouksen jaksotus on helpompaa, missä käytetään kutakuinkin tasalaatuista ja samaa polttoainetta sekä kuormat ovat vakaat. Yksi hyvä esimerkki on Haapaveden voimalaitos, jossa käytetään pelkästään turvetta. Haapavedellä tulistinosa nuohotaan 6 vrk:n välein. Eko nuohotaan noin 10 min välein, koska kyseisessä voimalassa on ekon kohdalle asennettu vuonna 1998 ääninuohoimet. Luvo nuohotaan 3 vrk:n välein [8]. On myös huomioitava, että pelkän turpeen sisältämä tuhka on koostumukseltaan erilaista, joten lämpöpintojen likaantuminenkaan ei välttämättä ole niin voimakasta, vaikka turve sisältääkin paljon tuhkaa (noin 5 %). Polttoaineen kosteus turpeen pölypoltossa on alhainen, vain noin 10 %.

Höyrynuohouksen edut:

- halvat perustuskustannukset
- höyry omasta laitoksesta
- puhalluspaine säädettävissä
- lyhyet puhallusjaksot verrattuna ilmanuohoukseen.

Höyrynuohouksen haitat:

- kasvattaa lisäveden tarvetta
- voi lisätä rikkihapon muodostusta
- putkistojen lämpölaajeneminen huomioitava
- suuri huollontarve
- lisää tuhkan ja savukaasun kosteutta
- putkistot on eristettävä
- voi aiheuttaa painevaihtelua
- kuumuudesta johtuvat turvallisuustekijät.

Ilmanuohouksen edut:

- halvat huoltokustannukset
- putkilinja on edullinen (eristystä ei tarvita)
- putkilinjojen vesityksiä ei tarvita (vrt. höyrynuohous)
- lämpöliikkeitä ei tarvitse huomioida
- savukaasujen ja tuhkan kosteus ei lisäännä.

Ilmanuohouksen haitat:

- kalliit hankintakustannukset(kompressorilaitos)
- puhallusjakso pitkä
- tuhkapitoisten pintojen tulipalovaara.

7.2 Nuohouslaitteet

Yksinkertaisissa tuliputkikattiloissa lika poistetaan seisokin aikana sopivilla teräs-harjoilla: Poikkileikkaukseltaan ympyränmuotoisella ja pitkävartisella harjalla, joka työnnetään puhdistettavan putken läpi. Tämä on tehokas, mutta työläs keino ja vaatii kattilan käynnin keskeytyksen. Tämän keinon soveltamista suuriin kattiloihin on mahdoton toteuttaa. Suuret kattilat ovat yleensä käytössä 24 h vuorokaudessa, läpi vuoden.

Tuliputkikattiloiden lieskauunit ja vesiputkikattiloiden likaa keräävät tuli- ja konvektiopinnat voidaan nuohota höyryllä, paineilmalla, vedellä tai ääninuohoimilla. Lisäksi on olemassa kuulanuohouslaitteita ja mekaanisia ”tärstimä”, joilla voidaan puhdistaa erinäisiä osia konvektiopinnoista.

Pienten vesiputkikattiloiden konvektiopintoja nuohotaan käsin ohjattavalla höyry- tai vesiletkulla. Suurten kattiloiden konvektiopinnat nuohotaan täysin koneellisesti, jolloin nuohous tapahtuu halutun ohjelman mukaan automaattisesti.

Kiinteät puhallusnuohoimet voidaan jakaa viiteen pääryhmään:

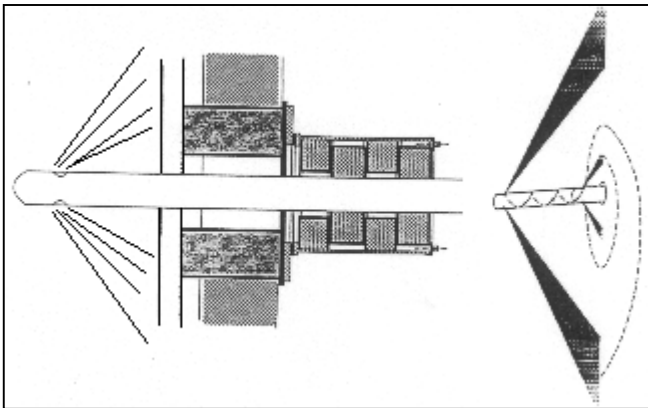
- seinänuohoimiin
- ulosvedettäviin nuohoimiin
- pyöriviin monisuutinnuohoimiin
- haravanuohoimiin
- pyörivien ilman esilämmittimien (**luvo**) nuohoimiin.

Mekaaniset puhdistuslaitteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään:

- kuulanuohouslaitteet
- mekaaniset ravistuslaitteet
- ääninuohouslaitteet

7.3 Seinänuohoin

Suutinputki työntyy kattilaan (0,2 - 0,25 m) ja puhalttaa vinosti tulipesän seinään (kuva 10). Puhdistussäde n. 2 m riippuen valmistajasta ja käytetystä höyryn paineesta. Käyttölämpötila-alue voi olla jopa lähelle 1500 °C. Suuttimien lukumäärä on yleensä kaksi.



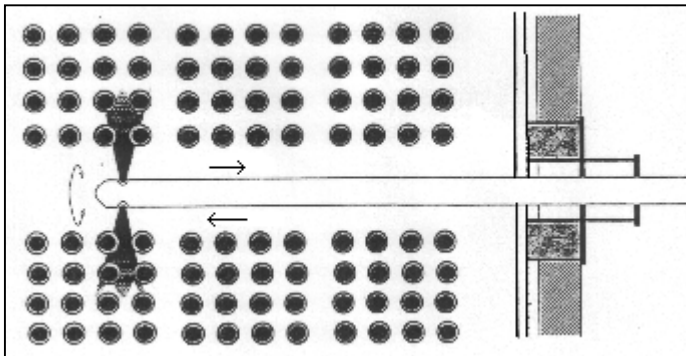
Kuva 10. Seinänuohoimen periaatekuva[3, s.214]

7.4 Ulosvedettävä nuohoin

Tulistimien nuohous korkeissa lämpötiloissa < 1500 °C. Nuohoinputki työnnetään kattilan sisälle vain nuohotessa (kuva 11). Nuohoin voi olla yksisuutin- tai moni-

suutinnuohoin. Nuohoin vedetään pois kattilasta heti nuohouksen loputtua. Pituutta nuohoinputkella voi olla jopa 16 m.

Kainuun Voimalla on kahdeksan tämäntyyppistä nuohointa, joilla tulistinalueet puhdistetaan. Nuohouksen alkaessa on nuohoin takimmaisessa asennossa. Kun nuohoin käynnistetään, liikkuu vaunu suutinputkineen eteenpäin ja vie suuttimen pyörivällä liikkeellä kattilaan. Kun vaunu on liikkunut niin pitkälle, että suuttimet ovat tulleet kattilaseinän sisäpuolelle, aukeaa höyryn tuloventtiili. Vaunu kulkee etummaiseen kääntöasentoon ja palaa takaisin lähtöasentoon. Juuri ennen lähtöasentoa sulkeutuu höyryn tuloventtiili. Nuohoimen etupäässä on kaksi suutinta, joista nuohoushöyry virtaa yläääninopeudella. Takaisin kääntymisen yhteydessä tapahtuu 25 mm vaihesiirtymä ja suuttimet palaavat takaisin toista rataa kuin sisään mennessä, tästä johtuen syntyy puhdistusspiraali, jossa suuttimen tehollinen puhallusväli on 25 mm. Iskunpituus on 7,6 m.

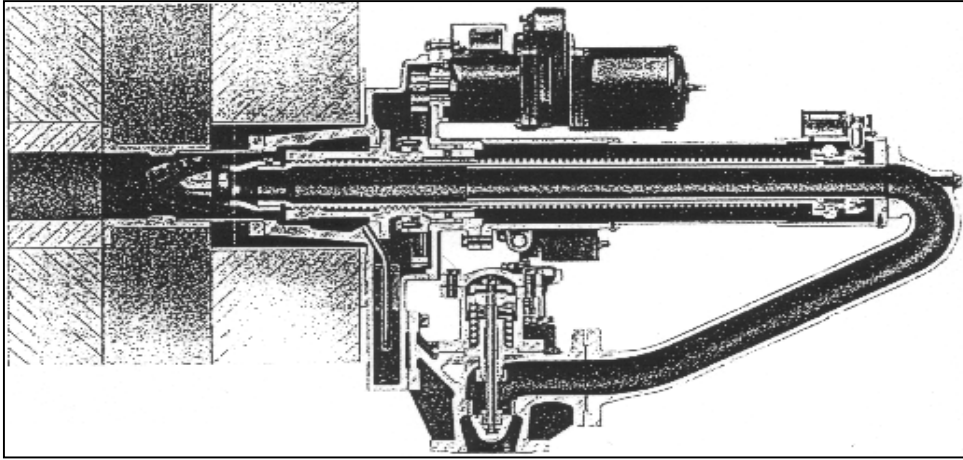


Kuva 11. Pyörivän sisääntyönnettävän nuohoimen periaatekuva [3, s.215]

7.5 Yksisuutinnuohoin

Ulomman, kierteellä varustetun putken päässä on suutin, joka tässä muodostaa kolme suihkua (kuva 12). Putki on paikallaan pysyvän, kierteillä varustetun holkin sisällä. Putkea pyörittää sähkömoottori hammaspyörien välityksellä. Nuohouksen alkaessa lähtee sähkömoottori pyörimään, pyörittää kierreholkkia ja liikuttaa nuohoinsuuttimen kattilan sisään. Kun suutin on nuohousasemassa, avautuu venttiili, joka päästää höyryä nuohoushöyryventtiilin karan yläpäässä olevan männän päälle. Kun nuohous on kestänyt halutun ajan, moottorin kiertosuunta vaihtuu ja

suutinputki palaa alkuasentoon. Nuohoushöyryventtiili sulkeutuu ennen suuttimen vetäytymistä kattilaseinän sisään. [luento materiaali s.121]

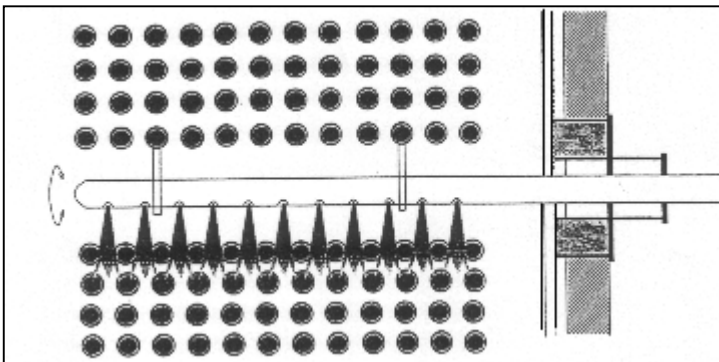


Kuva 12. Yksisuutinnuohoin [luentomateriaali s.121]

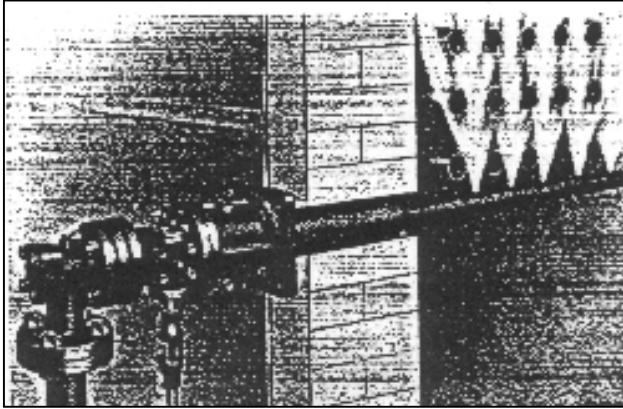
7.6 Monisuutinnuohoin

Tämä nuohoin voi olla käsi- tai moottorikäyttöinen. Nuohousputki on varustettu usealla suuttimella. Suuttimien lukumäärä määräytyy yleensä esim. puhdistettavien putkirivien mukaan. Tällöin suuttimien lukumäärä on, joko yksi vähemmän tai yksi enemmän kuin puhdistettavien putkirivien määrä (kuvat 13, 14). Tällä menetelmällä varmistetaan jokaisen putkirivin puhdistuminen. Nuohousputki pysyy paikoillaan ja suorittaa määrätyn kulman, esim. 180°:n suuruisen pyörintäliikkeen.

Kainuun Voimalla on tämäntyyppiset nuohoimet (20 kpl) takavedossa, jossa eko sijaitsee. Nuohoimet tekevät toimiessaan 360°:n suuruisen pyörähdysliikkeen. Pituutta nuohoinputkilla on noin viisi metriä.



Kuva 13. Kiinteän ja pyörivän monisuutinnuohoimen periaatekuva [3, s.215]

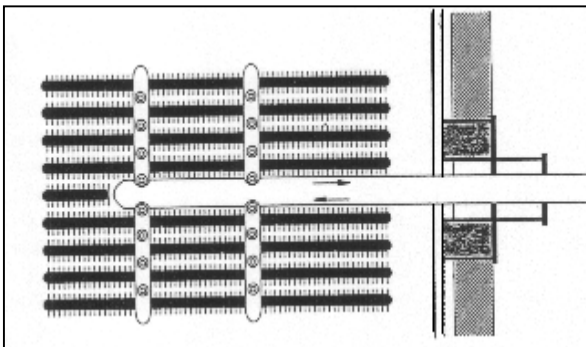


Kuva 14. Kiinteä, osittain pyörivä monisuutinnuohoin [luento materiaali s.121]

Monisuutinnuohointa käytetään kattilan keskiosan ja peräpään konvektiopintojen nuohoukseen. Nuohoin on asennettu kiinteästi kattilan sisäpuolelle. Käyttölämpötila-alue $< 800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nuohoinputkien maksimipituutena on 6 m.

7.7 Haravanuohoin

Haravanuohointa käytetään yleensä ilmanesilämmittimen valurautaisten ripaputkien puhdistukseen. Käyttölämpötila-alue $< 800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nuohoimessa on poikittaisia suutinputkia ja suutin joka putkiraon kohdalla (kuva 15).

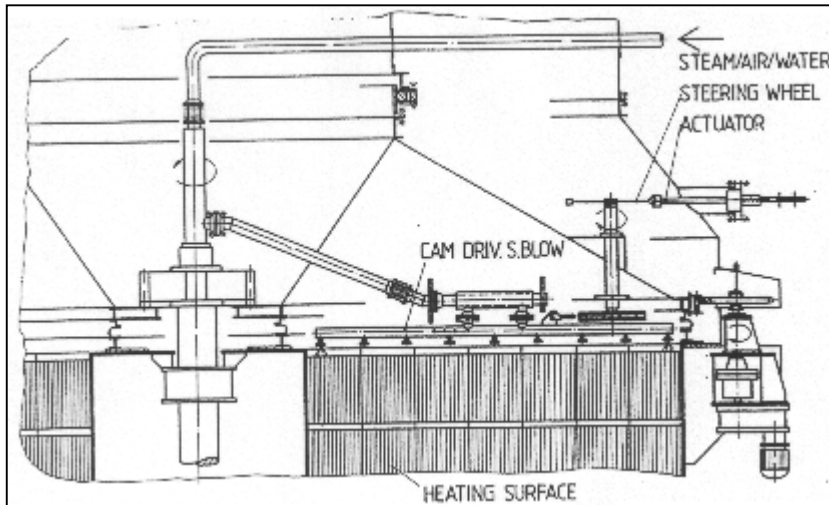


Kuva 15. haravanuohoimen periaatekuva [3, s.216]

7.8 Pyörivän luvon nuohoin

Luvo nuohotaan yleensä höyryllä tai jopa vedellä. Vesinuohous on yleensä luvolla ainut "häätäkeino", jos kattilaa ei voida jostain syystä ajaa alas ja kennosto on tukkeutunut (kuva 16).

Tavallisesti luvu nuohotaan kahdella höyrynuohoimella, jotka sijaitsevat savukaasukanavassa kylmällä ja kuumalla puolen luvua (kuva17). Nuohoimen iskunpituus on säädettävissä max. 1900 mm.



Kuva 16. Pyörivän Luvon nuohoin [3, s.216]



Kuva 17. Kainuun Voiman luvon höyrynuohoin kylmällä puolella savukaasukanavassa (talviseisokki 2002/2003)

Nuohoimen (kuva 17) eteen liike on jaksoittaista, eli nuohoin liikkuu eteen vain ajon aikana (noin 10 s.), lähtien taas liikkeelle taukoajan päätyttyä (noin 30 s.). Saavut-

tuaan kääntörajalle nuohoimen suunta vaihtuu ja se palaa yhtäjaksoisesti lepo-rajalle.

7.9 Kuulanuhouslaitteet

Kuulanuhouksessa kuulat pudotetaan vaakasuorien konvektiopintojen päälle ja lämpöpinnat puhdistuvat mekaanisesti kuulien osuttua niihin. Kun kuulat ovat pudonneet savusolan alapäähän kuulankerääjään, ne kuljetetaan takaisin ylös pneumaattisesti. Kuulankerääjästä kuulat pudotetaan kuljetussuuttimeen, josta voimakas ilmavirta tempaa ne mukaansa. Kattilan yläpuolella erotin erottaa kuulat ilma-
virrasta, ja ne siirtyvät kahdelle jakelijalle, jotka ovat jakeluputkien päässä (kuva 18). Jakelijan kimmokappale ottaa vastaan putkesta tulevat kuulat, jotka kimmokappaleeseen osuttuaan leviävät tasaisena sateena konvektiopinnoille. Pneumaattisten kuljettimien ohella kuulia siirretään myös kola- tai magneettikuljettimilla. Kuulat ovat terästä, valurautaa tai alumiinia, ja niiden halkaisija on 3 - 9 mm. Alumiinikuulat ovat terästä pehmeämpiä ja siten kuluttavat vähemmän konvektiopintoja. Alumiinikuulien puhdistustehokkuus ei ole niin hyvä kuin teräskuulilla, johon tuen sekä painosta ja pehmeydestä. [3]

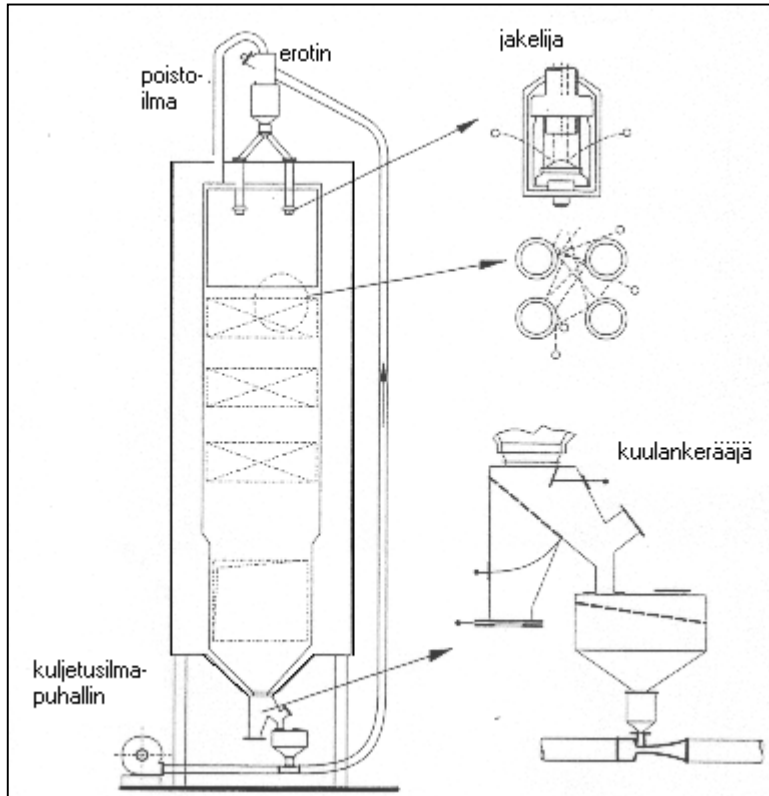
Kuulanuhouksella puhdistetaan esim. hiilipölykattiloista tulistimen jälkeisten konvektiopintojen helposti irtoavaa likaa. Kuulanuhoinlaitteistot ovat nykykattiloissa harvinaisia.

Kuulanuhouksen edut:

- halvat investointi- ja käyttökustannukset
- korroosiovaara ei lisäännä kattilan kylmässä osassa.

Kuulanuhouksen haitat:

- kuulat tukkivat ahtaita välejä
- kuulat kuluttavat lämpöpintoja
- ei sovellu ylipaine kattiloihin
- vaatii laitetilaa kattilahuoneessa.



Kuva 18. Kuulanuohoinlaitteiston periaatekuva [3, s.218]

7.10 Mekaaniset ravistuslaitteet

Mekaanisia ravistuslaitteita käytetään erittäin likaisissa oloissa. Laitteen toiminta perustuu iskun aiheuttamaan liikkeeseen, jolle pyritään saamaan mahdollisimman suuri kiihtyvyys ja pieni amplitudi. Siten mekaaniset rasituksen jäävät mahdollisimman vähäisiksi ja saavutetaan hyvä puhdistustulos. Värähtely saadaan aikaan esim. iskuvasaralla tai epäkeskotäristimellä. Värähtely johdetaan puhdistettavaan kohteeseen.

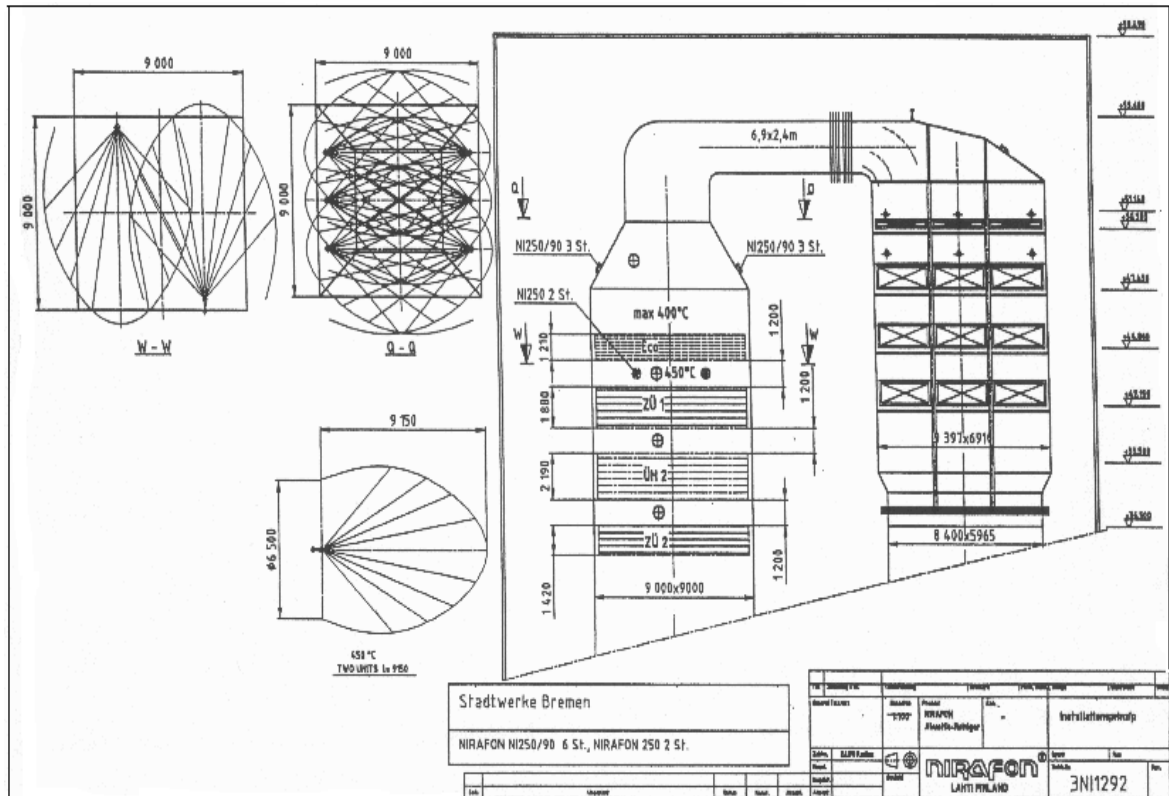
Ravistuslaitteiden edut:

- halvat investointi- ja käyttökustannukset
- korroosiovaara ei lisäännä kattilan kylmässä osassa

Ravistuslaitteiden haitat:

- melu
- jatkuva huollontarve

Ääninuohouksen etuja voidaan pitää merkittävinä, johtuen yksinkertaisesta rakenteesta ja käytön helppoudesta. Nuohousjaksojen tihentämisestäkään ei synny minäkäänlaisia haittoja prosessiin. Ääninuohoimet synnyttävät noin 6,5 m leveän ja 9 m pitkän pallomaisen äänipaineiskun (kuva 20). Nuohoimilla on mahdollista puhdistaa jopa katvealueella sijaitsevat konvektiopinnat, koska ääniaalto ”kimpoilee” rakenteista ja näin puhdistaa epäsuorasti piilossakin olevat pinnat.



Kuva 20. Ääninuohoimet erään kattilan takavedossa [11]

Edut lyhyesti:

- halvat investointi- ja käyttökustannukset
- korroosiovaara ei lisäännä kattilan kylmässä osassa
- ei haitallisia lisäkaasuja prosessiin
- tilantarve on vähäinen
- järjestelmän takaisinmaksuaika on lyhyt
- vähentää kattilan lisäveden tarvetta.

Ääninuohouksen haitat:

- ei sovellu vaikeasti puhdistettavalle lialle
- melu voi olla haitallista.

8 ÄÄNINUOHOIMET KAINUUN VOIMA OY:N LUVOSSA

8.1 Alkutietojen kerääminen

Insinööritöön alkuvaiheessa selvitettiin ääninuohojen luotettavuutta ja puhdistuskykyä. Selvitys vaiheessa soitettiin useaan höyrykattilavoimalaan, joihin kyseisiä ääninuohoja oli asennettu. Tiedot näistä voimaloista saatiin ääninuohojen valmistajan (Nirafon) esitteistä, jotka tilattiin valmistajalta. Selvitys vaiheen jälkeen tultiin yhä vakuuttuneemmaksi siitä, että ääninuohot voisivat olla hyvä ratkaisu myös Kainuun Voiman kattilassa, etenkin luvossa ja takavedon konvektio-osassa. Keneltäkään henkilöltä emme saaneet negatiivista palautetta ääninuohojen käytöstä. Ääninuohojen kalvojen kestävyys on vähintäänkin yksi vuosi. Ääninuohojen kalvo kannattaa kääntää aina puolivuositain, koska se lisää kalvon kestävyyttä.

Eniten ääninuohoja on Suomessa asennettu takavedon konvektio-osalle. Espoon Sähkön Suomenojan lämmitysvoimalaitoksella on suoritettu vertailuajo höyrynuohojen ja ääninuohojen kesken vuonna 2000. Kattilaan asennettiin konvektio-osalle 12 ääninuohoa. Nämä 12 ääninuohoa korvasivat kattilan konvektio-osan 18 höyrynuohoa. Lisäksi kahteen luvoon asennettiin 8 ääninuohoa, joilla korvattiin luvoissa olleet höyrynuohot. Tuloksena oli, että ekon lämpöteho parani noin 0,2 MW ja luvon paine-eroa saatiin pienennettyä noin 1,5 mbar (ka. 11 mbar:sta 9,5 mbar:iin). Vuosisäästöksi saatiin noin 0,3 miljoonaa markkaa. Summa koostuu säästyneestä höyrynhinnasta ja kattilan parantuneesta hyötysuhteesta. Näin laskien 20 ääninuohojen takaisinmaksuaika on 3 - 4 vuotta. Laskelma ei sisällä höyrynuohojen aiheuttaman korroosion ja eroosion kustannuksia.[11]

Puhdistustehokkuus näyttäisi joissain tapauksissa olevan jopa parempi kuin perinteisillä höyrynuohojilla. Jos ei parempi, niin ainakin riskittömämpi. Periaatteessa ääninuohojen ei ole prosessiin mitään haittaa, vaikka nuohouskertoja lisättäisiin kuinka paljon tahansa. Ainut haittamahdollisuus on, jos kalvo pääsee rikkoutumaan. Silloin paineilma pääsee suoraan kattilan sisälle puhdistettaville pinnoille ja

voi aiheuttaa painevaihteluja sekä tulipalovaaraa tuhkapitoisilla pinnoilla. Tämä vaaratekijä voidaan eliminoida vaihtamalla ääninuohoimien kalvot ajoissa, siis ker-
ran vuodessa.

Ääninuohoimien kiistattomana etuna voidaankin pitää sitä, että nuohouksien tauko-
ajat saadaan todella pieniksi. Käytetyin tauko-aika on Suomessa vain 10 min - 15
min. Juuri tästä syystä on mahdollista, että lämpöpinnat pysyvät puhtaampina kuin
perinteisillä höyrynuohoimilla. On myös huomioitava, että lentotuhka irtoaa lämpö-
pinnoilta helpommin, koska se ei ehdi ”kasaantua” ja kovettua (sintraantua). Ko-
vettunut tuhka voi myös lisätä haitallista eroosiota irtautuessaan lämpöpinnoilta.

Alla lista voimaloista, henkilöistä ja nuohoimien paikoista, joihin oltiin puhelin-
yhteydessä:

- Espoo T. Ahonen, 20 kpl takavedossa+4 kpl luvo
- Heinola J. Vuori, 16 kpl takaveto
- Lahti J. Mäenpää, takaveto
- Helsinki R. Kontro, 4 kpl luvo
- Vaasa M. Holm, Vaskiluodon Voima 4 kpl luvo
- Meri – Pori J. Koski, 6 kpl luvo (suomen suurin).

Haapaveden Fortumin kattilaan oli asennettu konvektio-osaan ekon kohdalle 6
ääninuohointa kuuden höyrynuohoimen rinnalle. Haapaveden voimalaitoksellakin
olttiin kiinnostuneita lisäämään ääninuohoimien määrää ainakin luvoon, koska ekon
kohdalla ääninuohoimista saadut kokemukset ovat olleet positiivisia. Haapavedellä
ääninuohoinasennuksen jälkeen ei ole tarvinnut höyrynuohoimia käyttää, vaikka
vanhat nuohoimet ovat edelleen käyttökunnossa omilla paikoillaan [8]. Yleensä on
kannattamatonta purkaa vanhoja höyrynuohoimia, mikäli niitä ei ole pakko poistaa
uusien tieltä.

Tapasimme Nirafonin edustaja Kimmo Savolaisen kanssa Kainuun Voimalla
17.12.2002. Hän toimitti pyytämäni tarjouksen minulle ja keskustelimme ääni-

nuohoimista sekä niiden asentamisesta. Kävimme myös alustavasti katsomassa mahdolliset paikat ääninuohoimille luvoon. Lisäksi katsoimme esittelyvideon ääninuohoimien toiminnasta. Videossa oli erään voimalaitoksen nuohous luvon osalta jätetty ennen seisokkia viimeisen vuorokauden osalta suorittamatta. Video oli kuvattu savukaasukanavasta luvon kylmältä puolelta. Ääninuohouksen alettua lika irtaantui todella hyvin luvon kennoston pinnasta. Ääninuohous suoritettiin useaan kertaan luvon pyöriessä. Kattilan käynninaikana tilanne on tietysti aivan toinen (savukaasujen lämpötila ja kosteus). Kuitenkin videosta kävi hyvin ilmi se, että ääninuohoimien puhdistusteho on vähintäänkin kohtuullinen.

8.2 Ääninuohoimien investointikustannukset

Investointikustannukset ovat laitteiston osalta 23 800 € +alv (5950 €/kpl). Jokaisen nuohoimen toimitukseen sisältyy PCG 1 R1/2” venttiiliryhmä, jossa on palloventtiili, pikaliittimet, ilmansuodatin, paineensäädin nestevaimennetulla painemittarilla, magneettiventtiili 230 V / 50 Hz / 11 W, huuhtelu- ja jäähdytysilmaventtiili ja kalvon takapaineen säätöventtiili. Lisäksi toimitukseen kuuluu asennus- ja hoito-ohjeet sekä sijoitusohjeet. Tarvittava ilmanpaine on 6 bar, ilmamäärät: n. 25 l/s toimiessa, jäähdytys- ja huuhteluilma n. 2 l/s jatkuvaa kulutusta (vapaaksi ilmaksi laskettuna).

Ohjelmoitavan ohjausyksikön saa lisähintaan 4 200 € + alv. Ohjausyksiköllä voidaan ohjata käyttö- ja taukoajat niin, että nuohoimet toimivat prosessin mukaan paine-eron tai lämpötilaeron perusteella tai valvomosta ohjattuna. Ensiohjelmointi sisältyy hintaan.

Ääninuohoimien ohjausperiaate on yksinkertainen. Nuohoimia ohjataan magneettiventtiilin avulla. Magneettiventtiili päästää paineilman nuohoimen kalvolle, joka saa aikaan pallomaisen äänipaineiskun halutulle puhdistuskohteelle. Jäähdytysilma kalvolle säädetään mekaanisesti ohitusventtiilillä magneettiventtiilin ohitse.

Suosittelavaa on käyttää laitoksen omaa ohjausjärjestelmää, joka on muutenkin uusiutumassa Kainuun Voimalla vuoden 2003 aikana. Meri-Porin voimalaitoksellakin ääninuohoimia ohjataan luvon kohdalla laitoksen omalla logiikalla. Yleisin tapa ääninuohoimien ohjaukseen on käyttää yksinkertaisia kellokytkimiä. Kellokytkimillä saadaan halutut nuohouksien taukoajat säädettyä helposti manuaalisesti.

Asennuskuluihin pitää liittää myös paineilmaputkistosta syntyvät kustannukset, jotka sisältävät putkimateriaalit ja asennuskulut. Putkien ja nuohoimien asennukset voi suorittaa Kainuun Voiman oma osaava kunnossapitohenkilökunta. Mutta jos oma henkilöstö on muiden seisokkityökiireiden takia estynyt suorittamasta asennusta, niin suositeltavaa olisi käyttää sellaista asennusfirmaa joilla on kokemusta ko. nuohoimien asentamisesta, esim. Imatran Hitsauspalvelu.

Eri voimaloiden käyttämät putkimateriaalit ääninuohoimille vaihtelevat paljon. Edullisin vaihtoehto olisi käyttää kumiletkua, mutta kestävyys kannalta olisi suotavaa käyttää metalliputkea. Metalliputkista ehkä paras olisi ruostumaton teräs, koska putken sisäpinnan laatu on hyvä ja se on ruostumaton. Paineilmalinja kulkee kattilan ympärillä useissa eri kohdissa. Näin ollen putkilinja ääninuohoimille kannattaa tietysti vetää lähimmästä paineilmalinjasta, jotta vältetään turhalta työltä.

Putkilinjat ja ohjausjärjestelmänkaapelit kannattaa valmistella mahdollisimman valmiiksi ennen ääninuohoimien asennusta. Työt voidaan suorittaa aina silloin, kun laitoksen omalla henkilöstöllä ei ole muutakaan tekemistä, ns. täytetöinä.

Putkimateriaaliksi voidaan valita esim. ruostumaton DN 15. Putkea kuluu noin 4 salkoa (6 m/kpl). Myös mutkia ja liittimiä kuluu asennustavasta riippuen jonkin verran. Putkistomateriaalista johtuvat kustannukset ovat noin 250 €.

Magneettiventtiileille vedettävät ohjauskaapelit vievät myös oman aikansa. Aikaa näiden vetoon kuluu arviolta noin 20 miestuntia.

Luvoon savukaasukanavaan tehtävät aukot ei ole mahdollista tehdä ennen seiso-kin alkua. Reikien tekoonkin kuluu oma aikansa. Näin ollen kokonaisuudessa ääni-
nuohoimien asennukseen kuluu työtunteja huomattavan paljon.

Ääninuohoimet on myös äänieristettävä ulkoapäin. Ääninuohoimien äänen-
voimakkuus on savukaasukanavan sisällä noin 150 dB ja kattilan ulkopuolella Ni-
rafonin mukaan noin 105 dB. Ääneneristykseen voidaan käyttää peltikoteloja, missä
on villaa sisällä äänen vaimentamiseen tai esim. liitteen B mukaista äänieristys-
koteloa. Edullisin vaihtoehto on käyttää villalla täytettyä peltistä koteloa, joka on
purettavissa kalvoa vaihdettaessa. Tällaiset peltikotelot olivat myös käytössä Haa-
paveden voimalaitoksella. Ääninuohoimien aiheuttama melu erottuu varsin selvästi
muusta prosessista. Tämä johtuu ääninuohoimien käyttämästä matalasta äänen-
taajuudesta (250 Hz). Näin ollen kattilahuoneessa oltaessa on selvästi havaitta-
vissa, milloin ääninuohous on käynnissä. Äänen eristyksestä aiheutuvat kulut on
noin 150 €.

*Taulukko 3. Ääninuohoimien investointikustannukset, kun käytetään omaa ohjaus-
järjestelmää:*

LAITTEISTO	23 800 € +alv
putkimateriaali + osat	400 €
työtunnit 60 h * 30 €/h	1 800 €
yhteensä	26 000 €

Suurin osa investointikustannuksesta koostuu laitteiston hinnasta. Näin ollen
yleensä ei muista materiaaleista aiheutuvia kuluja ole huomioitu takaisinmaksua
määritettäessä. Kuitenkin tässä tapauksessa muista kuin laitteistosta aiheutuvat
kustannukset ovat varsin merkittäviä.

8.3 Ääninuohoimien asennus luvon

Ääninuohoimien positoiden sekä määrän määrittämiseen lähetettiin Kainuun Voiman arkistoista Nirafonille kuvia, joista selvisi savukaasukanavan ja luvon mitat. Myös savukaasujen lämpötilat ennen ja jälkeen luvon ovat tärkeitä, koska niistä selviää tarvittavien jäähdytysilmamäärien tarve. Ääninuohoimien kalvojen kestävyys heikkenee merkittävästi, jos lämpötila on yli 250 °C. Näin ollen on tärkeää, että jäähdytysilmaa johdetaan sellaisiin nuohoiimiin, joiden lämpötila ylittää sen.

Nuohoimien asentamisesta olimme yhtä mieltä siitä, että nuohoimet kannattaisi sijoittaa savukaasukanavaan siten, että nuohousäänipulssi olisi voimakkain siinä kohden, jossa luvon kennosto tulee ilmapuolelta savukaasukanavaan. Tällä menetelmällä estetään irronneen lian kulkeutuminen ilmapuolelle. Tuhka ilmakehässä voi aiheuttaa turhaa eroosiota esim. ilmapelleissä. On kuitenkin huomioitava, että tuhkaa pääsee jonkin verran normaalikäytössäkin ilmakehiin, eikä se välttämättä aiheuta haitallista kulumista. Myös höyrynuohoimet on yleensä sijoitettu samalla periaatteella.

Ääninuohoimien määräksi määritettiin Nirafonilla 4 kpl (Nirafon 250/90), kaksi savukaasukanavan kuumalle puolelle ja kaksi kylmälle puolelle. Piirrettiin CAD-ohjelmalla asennusperiaatekuva (liite A). Piirtämisessä käytettiin hyväksi Vantaan energialle tehtyä CAD-kuvaa. Myös Vantaan höyrykattilalla on luvon asennettu ääninuohoimet samalla periaatteella kuin liitteessä A. Tämä kappalemäärä ja nuohoimien sijoitus on osoittautunut hyväksi muillakin voimalaitoksilla. Määrän ratkaisee luvon koko, esim. Meri - Porin hiilivoimalalla, joka on Suomen suurin yksittäinen voimala (sähköteho 560 MW), luvossa on kuusi nuohointa, koska luvo on huomattavan suuri (halk. 17 m).

Paikkojen määrittelyssä tulee ottaa huomioon nuohoimien huollettavuus ja mahdollisten hoitotasojen olemassaolo, jotta välttyttäisiin ylimääräisiltä hoitotasorakenteilta ja huoltotyöt olisi mahdollista suorittaa turvallisesti.

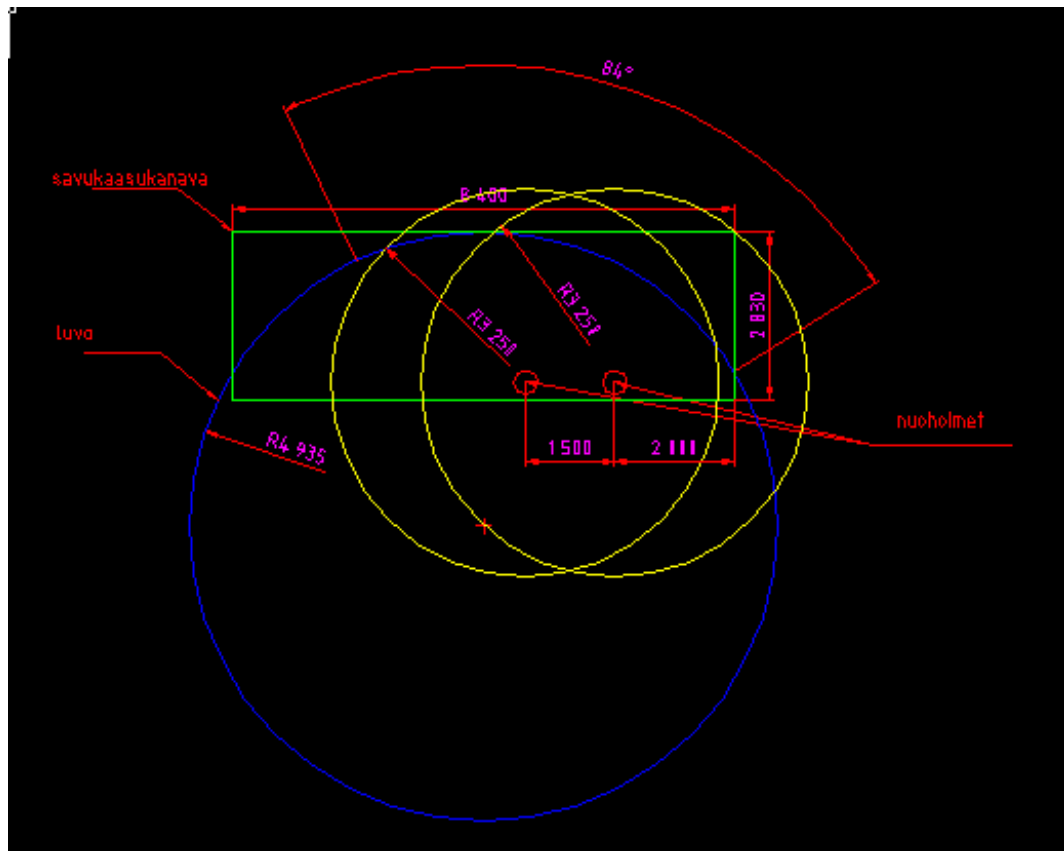
Mielestäni yksi hyvä ratkaisu olisi sijoittaa nuohoimet kuumalle ja kylmälle puolelle siten, että toinen nuohoin tulisi savukaasukanavan reunasta 2 m:n ja toinen 1,5 m:n päähän siitä (liite A), mistä luvon kennosto tulee savukaasukanavaan. Savukaasukanava on 8400 mm leveä ja 2830 mm paksu. Kuuman puolen nuohoimien asennuksessa voidaan käyttää hyväksi valmista hoitotasoa, joka kulkee luvon päällä. Kylmän pään asennuksessa voidaan käyttää alapuolen hoitotasoa hyväksi. Kylmän puolen asennuksessa voidaan käyttää samaa periaatetta kuin kuuman pään.

8.4 Ääninuohoimien käyttöohjeistus

Nuohoimia on suositeltavaa käyttää ”pareina” siten, että kuuma puoli toimisi omana parina sekä kylmä puoli omanaan yhtä aikaa. Tällä menetelmällä saataisiin lisätehoa fysiikan lain mukaan noin 3 dB. Laitevalmistajan suosittelema käyttöjakso on noin 4 s, 4 - 5 kertaa peräkkäin, jotka toistuvat 5 - 15 min:n. välein. Käytännössä käyttöjaksot tulee virittää laitokselle sopiviksi.[Nirafon]

Soitettuani eri voimaloihin oli kaikilla vähän epätietoisuutta siitä, miten ääninuohoimia tulisi luvon kohdalla käyttää. Nuohoimien käyttöohjeistus voidaan määrittää teoriassa yksinkertaisilla geometrian laskuilla.

Savukaasukanavan koko on 8400 mm x 2830 mm, joka on likimain sama kuin luvon ympyräsegmentti. Lisäksi pitää huomioida nuohoimien paikat, jos ne asennetaan kuten edellä on mainittu. Näin ollen tehollinen ympyräsegmenttialue, joka on nuohottavissa, voidaan määrittää CAD-ohjelmistoa hyväksikäyttäen. Lisäksi kun tiedetään ääninuohoimen painekeilan tehollinen halkaisija, joka on 6,5 m, niin voidaan teoreettisesti määrittää puhdistettava alue (kuva 21).



Kuva 21. Nuohoimien puhdistusalueen periaatekuva

Kun tiedetään luvon halkaisija 9870 mm, ja luvon astelukku (84°), joka on nuohottavissa, niin saadaan luvon kehän pituus, joka on nuohoushetkellä nuohottavissa verrannolla

$$\frac{360^\circ}{9870\text{mm} \times \pi} = \frac{84^\circ}{X} \Rightarrow X \approx 7235\text{mm} . \quad (4)$$

Luvon kehänopeus saadaan, kun tiedetään luvon pyörimisnopeus (1,5 rpm)

$$9870\text{ mm} \times \pi \times 1,5 / 60\text{ s} \approx 775\text{ mm/s} . \quad (5)$$

Oletetaan, että nuohousaika on 4 s, jolloin luvon alue, joka on nuohottavissa 4 s:n aikana, on

$$775 \text{ mm/s} \times 4 \text{ s} + 7235 \text{ mm} = 10335 \text{ mm}. \quad (6)$$

Teoreettiseksi taukoajaksi saadaan, kun jaetaan kehänopeus nuohottavan alueen kehänpituudella

$$7235 \text{ mm} / 775 \text{ mm/s} \approx 9,3 \text{ s}. \quad (7)$$

Siis noin 9,3 s:n tauon jälkeen savukaasukanavassa on alue, jota ei vielä ole nuohottu.

Peräkkäisien nuohouskertojen määräksi saadaan, kun jaetaan nuohottavissa oleva kehänpituus koko kehän pituudella

$$31008 \text{ mm} / 10335 \text{ mm} \approx 3. \quad (8)$$

Siis kolmen peräkkäisen nuohouskerran jälkeen, kun tauko aika on 9,3 s, on luvo teoreettisesti puhdistettu, jos nuohousaika on 4 s.

Kuitenkin suositeltavaa ainakin alkukokeiluvaiheessa olisi nuohoimia käyttää seuraavasti:

Nuohoimia käytetään kuten edellä on määritetty. Siis kuuman puolen nuohoimet toimisivat yhtä aikaa ja vastaavasti kylmän puolen nuohoimet yhtä aikaa. Ääni-nuohous aloitetaan kuuman puolen parilla. Neljä kertaa peräkkäin 9 s:n välein. Tämä toistettaisiin myös kylmällä puolella samalla tavalla, heti kuuman puolen lopetettua nuohous. Uusi kierto aloitettaisiin 16 min päästä nuohouksen loppu-hetkestä. Näin nuohouksen uusi kierto alkaisi luvon ollessa aina eri kohdassa ver-rattuna edelliseen nuohouskertaan. Lisäksi tällä menetelmällä luvo tulisi puhdis-

tettua osittain kahteen kertaan. Nuohoustaukoaika kannattaa valita siten, että nuohousjakso ei alkaisi aina samasta kohdasta. Ei tästä sinänsä vaaraa ole, mutta kannattaahan nuohoimia hyödyntää mahdollisimman hyvin.

Olisi myös mielestäni hyödyllistä ajoittaa ääninuohous siten, että kun muuta kattilaa nuohotaan höyrynuohoimilla, niin ääninuohoimien käyttö voisi tällä ajan hetkellä olla tiheämpää. Näin välttyttäisiin jo irronneen lian uudelleen tarttuminen luvoon, koska hiukkasmäärä kuitenkin kasvaa huomattavasti savukaasukanavaan ennen luvoa. Logiikan voisikin ohjelmoida siten, että höyrynuohouksen alkaessa tulee ääninuohoimille käsky alkaa nuohota tihennetyllä syklillä. Pitää myös huomioida, että jos ääninuohoimet ovat jo käynnissä tulee nuohoimet "nollata" ja aloittaa tihennetty nuohoussykli. Tihennetty nuohoussykli voisi olla esim. 4 kertaa peräkkäin 9 s:n välein, ja uusi kierto aloitettaisiin 8 min päästä ääninuohouksen loppu-hetkestä. Tämä toistuisi koko höyrynuohouksen ajan, ja palaisi normaaliin käyntiin höyrynuohouksen loputtua. Tämä nuohoussyklin muutos olisi myös helppo muistaa, koska se olisi muuten sama kuin normaalissa käytössä, paitsi höyrynuohouksen aikana ääninuohouskierron olisi kaksi kertaa tiheämpi (16 min \Rightarrow 8 min).

8.5 Höyrynuohoimista aiheutuvat kustannukset

Nuohouksessa kulunut höyryn määrä on huomattavan suuri, koska nuohousaika on pitkä, yht. n. 2 h 13 min. Näin ollen kosteudenkin määrä on huomattava ja otollinen rikkihapon synnylle, etenkin luvoa nuohottaessa. Nuohouksen sanotaankin olevan kattilamiesten keskuudessa "välttämätön paha". Nuohouksessa syntyvät kustannukset ovat huomattavia, johtuen suurista kunnossapitokustannuksista, laitteiston investoinneista ja käytetystä höyryn määrästä, joka lisää lisäveden tarvetta.

Nuohouksen kesto Kainuun Voimalla on keskimäärin 67 minuuttia, jolloin höyryä kuluu 1,7 kg/s (tulistin ja eko). Nuohous jatkuu pienemmällä höyrymäärällä, jonka kesto keskimäärin on 66 minuuttia, jolloin höyryä kuluu 0,3 kg/s (luvo). Höyry ote-

taan välitulistimen (2 A) jälkeen, jolloin paine on noin 130 bar ja lämpötila noin 410 °C. Paine alennetaan paineenalennusventtiilillä 23 - 24 bar:iin ja vastaavasti lämpötila pudotetaan 320 °C:seen. Tällä paineella ja lämpötilalla suoritetaan nuohous. Höyryn kulutuksen määrä on noin 8000 kg/nuohouskerta.

Nuohoushöyryn määrän mittausta on ennen paineenalennusventtiiliä, joten luvon nuohoukseen kulunut energiamäärä saadaan laskettua entalpian avulla. Entalpia-arvo voidaan lukea taulukosta, kun tiedetään paine ja lämpötila.

Otetaan taulukosta entalpia-arvo, arvoilla 400 °C ja 125 bar \Rightarrow 3039,3 kJ/kg. Tämä tarkoittaa sitä energiamäärää, mikä kuluu veden jokaista kilogrammaa kohden lämmitettäessä vesi 0 °C:sta \Rightarrow 400 °C:seen 125 bar:n paineessa. Tätä entalpia-arvoa voidaan pitää varsin tarkkana tässä tapauksessa. On myös huomioitava, että höyryn määrä vaihtelee nuohouksen aikana jonkin verran ja esim. vesityksien ajat ovat epäsäännölliset. Näin ollen luvon nuohoukseen käytetyn höyryn muodostukseen kulunut energia voidaan laskea, kun tiedetään arvot:

- entalpia H [kJ/kg] = 3039,3 kJ/kg
- aika 66 min = 3960 s
- höyrymäärä = 0,3 kg/s
- kattilan hyötysuhde $[\eta]$ = 0,92

Energiankulutus saadaan, kun kerrotaan entalpia, aika ja höyrymäärä keskenään

$$3039,3 \text{ kJ/kg} * 3960 \text{ s} * 0,3 \text{ kg/s} \approx 3610,69 \text{ MJ.} \quad (9)$$

Kun jaetaan kaavalla 9 laskettu tulos hyötysuhteella, saadaan todellinen energian kulutus

$$3610,69 \text{ MJ} / 0,92 \approx 3924.66 \text{ MJ.} \quad (10)$$

Kun tiedetään, että $1 \text{ MJ} = 0,278 \text{ KWh}$, niin saadaan teho verrannolla

$$\frac{1 \text{ MJ}}{0,278 \text{ KWh}} = \frac{3924,66 \text{ MJ}}{X} \Rightarrow X \approx 1091,06 \text{ KWh} . \quad (11)$$

Energiakustannus jokaiselle luvon nuohouskerralle saadaan, kun tiedetään kattila-energi hinta, joka oli talvella 2002/2003 Kainuun Voimalla $9,78 \text{ €} / \text{MWh}$. Energian hinnaksi saadaan

$$9,78 \text{ €/MWh} * 1091,06 * 10^{-3} \text{ MWh} \approx 10,67 \text{ €} . \quad (12)$$

Nuohous kasvattaa myös lisäveden tarvetta (massa tase), jonka hinta on $0,75 \text{ €/t}$. Kun kerrotaan höyry määrä ajalla ja lisäveden hinnalla, saadaan lisäveden aiheuttama kustannuserä jokaiselle luvon nuohouskerralle

$$3960 \text{ s} * 0,3 * 10^{-3} \text{ t/s} * 0,75 \text{ €/t} = 0,89 \text{ €} . \quad (13)$$

Todellisuudessa lisäveden hinta on huomattavasti korkeampi, koska lisävesi joudutaan käsittelemään kemiallisesti, ennen kuin se voidaan johtaa kattilaan.

Nyt voidaan laskea kokonaiskustannushinta vuositasolla, kun tiedetään kattilan käyntiaika ja nuohouskertojen määrä. Käyntiaika on koko vuosi vähennettynä seisokkiajalla (n. 335 päivää). Seisokkiaika on keskimärin 1 kk vuodessa (sis. kesä- ja talviseisokki). Nuohouskertojen määrä vaihtelee 1 - 2 vrk. Otetaan keskiarvoksi 1,5 vrk. Kerrotaan nuohouskertojen määrä höyryn energiahinnalla ja lasketaan yhteen lisäveden kustannus, saadaan kattilavedestä ja höyryn määrästä aiheutuva kustannus vuositasolla

$$\frac{335 \text{ vrk}}{1,5 \text{ vrk}} \times 10,67 \text{ €} + \frac{335 \text{ vrk}}{1,5 \text{ vrk}} \times 0,89 \text{ €} = 2572,8 \text{ €} . \quad (14)$$

Eroosion aiheuttamat kustannukset ovat vaikeasti määritettäviä. On kuitenkin selvää, että ääninuohoimilla voidaan alentaa eroosiosta johtuvia kustannuksia etenkin luvon kohdalla. Vaarana on myös se, että mikäli suutinputki jää liian pitkäksi aikaa kattilaan, voi se taipua (tulistin ja eko) ja lisäksi suuttimista tuleva höyrysuihku aiheuttaa kulumista lämpöpinnoilla, koska höyryntuloventtiili on auki asennossa.

Höyrynuohoimet voivat myös pahimmassa tapauksessa syövyttää puhdistettavan pinnan puhki, jos nuohoin jumiutuu nuohouksen aikana. Näin on käynyt kerran Haapaveden turvevoimalalla [8].

Merkittävää on luvon kylmän pään kennoston hinta, 208 300 €. Kylmän pään kennoston hinta on huomattava, koska se on emaloitu. Luvon kylmän pään kennosto on emaloitu korroosion ehkäisemiseksi, mutta se ei tässä tapauksessa näyttäisi estävän kylmän puolen kennoston syöpymistä. Luvon kennosto on vaihdettu vuonna 1999. Noin 10 vuoden käytön jälkeen. Höyrynuohoimilla on ainakin osittain merkitystä luvon kennoston kulumiseen (eroosio ja korroosio). Mikäli ääninuohoimilla voitaisiin välttää kennoston uudelleen vaihto, niin se olisi merkittävin säästö, mitä ääninuohoininvestoinnilla voitaisiin saavuttaa. Laitoksen käyttöiäksi on määriteltä noin 25 vuotta. Tällöin näyttäisikin siltä, että luvon kennosto olisi vaihdettava kertaalleen, ellei muutoksia prosessiin tehdä.

Näyttäisi siltä, että höyrynuohoimien aiheuttama korroosio vaikutus luvon kohdalla on haitallisempi, kuin eroosion. Tämä voidaan ainakin osittain perustella sillä, että luvon kuuman puolen luvon kennostoa ei ole tarvinnut vaihtaa. Näin ollen jos kyse olisi pelkästä eroosiokulumisesta, olisi kuuman pään kennostokin pitänyt vaihtaa. Kuuman pään kennosto on vielä varsin hyvässä kunnossa, vaikka sitä ei ole koskaan vielä vaihdettu.

Luvon nuohoimien kunnossapitokustannusten määrittelyssä haastattelin Kainuun Voiman kunnossapitomestari J. Leinosta. Kupi – kustannukset ovat noin vuositasoa. Lisäksi luvon höyrynuohoimista aiheutuva tuhkan kosteuden lisääntyminen

lisää jonkin verran ongelmia tuhkalähettimissä ja niiden putkistoissa, koska tuhkan kosteus lisääntyy. Olen itsekin ollut puhdistamassa tuhkalähettimien putkia useaan kertaan. On ollut selvästi havaittavissa tuhkan kosteuden nousu höyrynuohouksen jälkeen. Näin ollen voidaan lisätä kupi-kustannuksiin puhdistustöitä vähintäänkin 8 h/vuosi.

Työmäärä sisältää sen mitä keskimäärin vuodessa kuluu tunteja luvon höyrynuohoimia huoltaessa sekä niistä aiheutuvia töitä. Työ määrä voi vaihdella hyvinkin paljon. Vuonna 1999, kun luvon kylmän pään kennosto vaihdettiin kului kennoston vaihtoon miestunteja noin 200 h. Luvon kennosto on erittäin työläs vaihdettava. [9]

On tietysti epäselvää, missä määrin höyrynuohoimien aiheuttama korroosio ja eroosio oli syynä kennoston vaihtoon, mutta olen melko varma siitä, että ääni-
nuohoimilla voidaan alentaa jossain määrin eroosiota ja korroosiota luvon kylmän pään kohdalla.

Miestuntihinta on keskiarvohinta. Nuohoimia huoltavat joskus omat miehet ja joskus jokin ulkopuolinen yritys, esim. Imatran Hitsauspalvelu.

Taulukko 4. Luvon höyrynuohoimien huoltokustannukset (ka.) vuositasolla:

kunnossapitokustannukset	
tiivisteet 100 €	100 €
kelkan ketju, joka liikuttaa nuohointa	40 €
höyrysuuttimet	40 €
työmäärä ka. 40 €/h * 30 h	1 200 €
yhteensä	1 380 €

Lisäksi voidaan laskea luvon kennoston vaihdosta aiheutuneet kustannukset

$$208\,300\text{ €} + 200\text{ h} \cdot 30\text{ €/h} = 214\,300\text{ €}.$$

(15)

Höyrynuohoimilla voi olla vaikutusta jopa ilmaston hiukkaspäästöihin. hiukkaspäästöt lisääntyvät nuohoushetkellä merkittävästi, koska höyrynuohoimien nuohousjaksotaukojen pituus on pitkä (ka. 1,5 vrk). Ääninuohoimilla saataisiin aikaan tasaisempi hiukkaskuormitus, koska nuohousjaksotaukojen ajat ovat huomattavasti lyhyemmät, vain noin 10 min. Tietenkin pelkän luvon kohdalla tämä vaikutus ei olisi merkittävä, mutta myöhemmässä vaiheessa, jos nuohoimia lisätään takavedon osalle vaikutus voisi olla huomattava.

Hiukkaspäästöillä on suuri merkitystä savukaasupuhaltimien siipien kulumiseen. Savukaasupuhallin pyörii 25 Hz:n taajuudella ja siinä on 22 muuttuvakulmaista siipeä. Puhaltimen siipipyörän halkaisija on noin 2 m. Tällöin siipien kehänopeus on noin 150 m/s. Eroosio puhaltimienkin siivissä voi jossakin määrin kasvaa. Tällainen tilanne on erityisesti silloin, kun sähkösuodatin ei toimi täydellisesti. Hiukkaspäästöjen kustannusarvio on mielestäni mahdoton tarkasti määrittää, mutta yleisesti energiatuotannossakin tulisi pyrkiä päästöjen vähentämiseen ja ilmanlaadun parantamiseen, jos se vain on kohtuuden rajoissa mahdollista.

8.6 Ääninuohoimista aiheutuvat kustannukset ja mahdolliset edut

Ääninuohoimien paineilmankulutus on huomattavaa vuositasolla. Kuitenkin paineilmalle ei usein ole määritetty minkäänlaista hintaa. Voimalaitoksella paineilmaa kuluu lähinnä tuhkankäsittelylaitteissa, sekä useassa paineilmalla toimivassa toimilaitteessa. Lisääntynyt paineilmamäärä kuluttaa ainakin kompressoreja sekä paineilmaverkoston laitteita, esim. suodattimet ja ilmankuivaimet. Laitoksen paineilmaverkosto paine on 8 bar, joka riittää hyvin ääninuohoimien toiminnalle (6 bar).

Kulunut paineilman määrä saadaan, kun tiedetään käytetty ilmanmäärä/nuohoin. Jokainen nuohoin kuluttaa toimiessaan paineilmaa noin 25 l/s, ja lisäksi jatkuvaa jäähdytysilmaa noin 2 l/s. Toimiessaan 4 s:n aikana ääninuohoimet kuluttavat paineilmaa 0,4 m³/nuohouskerta. Vuorokausikulutus saadaan, kun jaetaan nuohoustaukoaika (16 min) vuorokaudella (1440 min). Saadaan 96 nuohouskertaa

vuorokaudessa, josta seuraava paineilmankulutus on $38,4 \text{ m}^3$. Lisäksi jatkuvaa jäähdytysilmaa kuluu vrk:ssa noin 621 m^3 . Näin ollen yhteinen paineilmakulutus vuorokaudessa on noin $659,4 \text{ m}^3$. Vuosikulutus paineilmalle saadaan kertomalla vuorokausikulutus Kattilan käyntiajalla 335 vrk. Paineilman vuosikulutukseksi saadaan noin 220899 m^3 .

Paineilmalla voidaan määrittää myös energiahinta samalla tavalla kuten höyryllekin. Ääninuohoimien paineilman kulutus on määritetty, ns. vapaaksi ilmaksi, joten käytetään paineena normaalia ilmakehänpainetta ($101,325 \text{ kPa}$). Näin ollen voidaan paineilman kuluttama energia laskea kaavalla

$$ENERGIA_{pi} = p * \dot{V} * s. \quad (16)$$

p = normaalitilassa $101,325 * 10^3 \text{ Pa [N/m}^2]$

\dot{V} = paineilman virtaus määrä $[\text{m}^3/\text{s}]$

s = aika $[\text{s}]$

Lasketaan kaavalla 16 yhteen jatkuvan jäähdytysilman ja nuohoimien toimiessa aiheutunut energiankulutus. Näin saadaan energiankulutukseksi vuodessa $24765,4 \text{ MJ}$. Paineilma tuotetaan kompressorilla (hyötysuhde n. $0,86$), jota pyöritetään oikosulkumootorilla (hyötysuhde n. $0,96$). Sähkön pörssikeskihinta on tällä hetkellä (talvi 2002/2003) noin 32 €/MWh . Näin ollen saadaan kaavoilla 10,11 ja 12 laskettua paineilmasta aiheutuva energiahinta vuositasolla. Paineilman energiahinnaksi saadaan noin 267 € .

Paineilman energiahinta on varsin mitätön. Tämä on kuitenkin ainut suhteellisen järkevä keino paineilman hinnanmäärittämiseen. Käytännössä paineilman kulutus tulee jonkin verran vaihtelevaan, mutta hintatasomuutokset paineilmalle ovat varsin vakaat.

Materiaalikustannukset vuositasolla ovat 220 €/nuohoin, joka sisältää uuden kalvon. Lisäksi kalvonvaihtoon kuluu aikaa noin 1 h/nuohoin. Ja kun kalvot käännetään puolivuositain kuluu siihen aikaa saman verran eli 1h/nuohoin. Viikoittaisilla huoltokierroksilla tulee tarkistaa nuohoimien toiminta. Toiminta on helppo todeta kuuntelemalla ”törähdystä”. Nuohoimet ovat varsin toimintavarmoja, mutta esim. magneettiventtiilit vikaantuvat joskus. Magneettiventtiilin vikataajuus tässä tapauksessa on hyvin lähellä 1 vika/vuosi. Jos venttiili jää auki asentoon on se helposti todettu, koska ”törinä” vain jatkuu, mutta jos magneettiventtiili ei aukea voi se olla hankalampi todeta koska nuohoimet toimivat pareina, niin ei välttämättä kuule toimiiko kaksi nuohointa yhtä aikaa, vaiko yksi nuohoin.

Ääninuohoimien aiheuttamat kunnossapitokustannukset vuositasolla saadaan laskemalla yhteen materiaalihinta (220 €), huoltotöissä kulunut aika (8h)kerrottuna miestuntihinnalla (ka. 30 €/h), ja magneettiventtiilin (230 V / 50 Hz / 11 W) hinta, joka on noin 30 €/kpl. Kunnossapitokustannuserä vuositasolla on

$$220 \text{ €} \cdot 4 + 8 \text{ h} \cdot 30 \text{ €/h} + 30 \text{ €} = 1150 \text{ €}. \quad (17)$$

Ääninuohoimien mahdollisesti parantamaa luvon tehoa voidaan jälkikäteen määrittellä kaavalla

$$\Phi_{LUVO} = \dot{m} \times c_{pi} \times (t_2 - t_1). \quad (18)$$

\dot{m} = ilman massavirta [kg/s]

c_{pi} = ilman ominaislämpö 1 [kJ/kgK]

t_2 = ilmanlämpötila luvon jälkeen [K]

t_1 = ilmanlämpötila luvoa ennen [K].

Kaavan 18 arvot saadaan luettua vaivattomasta energiahallintaohjelman (EHJ) tietokoneen monitorista. Ilmamääränmittaus ohjelmasta luettuna on muotoa Nm³/s.

Tässä tapauksessa voidaan käyttää ilman ominaispainona $1,3 \text{ kg/m}^3$. Ilma otetaan kattilahuoneesta, missä vallitsee tasaiset olosuhteet (kosteus ja lämpötila). Näin ollen nettokuutiot saadaan muutettua kaavan vaatimaan muotoon kg/s . Lämpötilamittaus mittaa celsius asteina, joten ne saadaan muutettua kelvinasteiksi lisäämällä celsius lukuun 273 K ($273 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$). On tärkeää, että lämpötilat luetaan EHJ:stä höyryluvun jälkeen, jotta saadaan savukaasuluvun todellinen teho. Lisäksi on laskettava primääri- ja sekundääri puoli yhteen, jotta saadaan savukaasuluvun kokonaisteho. Primääri- ja sekundääri-ilma tuotetaan erillisillä puhaltimilla sekä ne johdetaan kattilaan erillisillä ilmakehällä luvojen (savukaasu ja höyry) lävitse.

Laskentaesimerkkinä käytettiin luvon lämpötehon määrittämiseksi 10.2.2002 EHJ:stä luettuja arvoja.

Taulukko 5. Palamisilmanarvot EHJ:llä luettuna Kainuun Voimalla 10.2.2002

	primääri-ilma	sekundääri-ilma
\dot{m}	82,42 kg/s	72,28 kg/s
t_2	526 K	528 K
t_1	347 K	332 K

Sijoitetaan taulukon 5 arvot kaavaan 18, niin saadaan tehoiksi 14,75 MW (primääri-puoli) ja 14,17 MW (sekundääripuoli). Näin ollen luvon kokonaislämpöteho on yhteenlaskettuna 28,92 MW.

Luvon lämpötehon mahdollista parantumista voidaan vertailla ääninuohoin-asennuksen jälkeen, tekemällä vertailu laskuja ennen asennusta ja asennuksen jälkeen. Lämpötilat ja ilman virtausmäärät voidaan lukea historiatiedoista jälkikäteen. On **tärkeää** tasapuolisen vertailun vuoksi huomioida kattilan käyttöaste. Näin ollen luotettavan luvon tehovertailun vuoksi savukaasun massavirta sekä lämpötila savukaasuilla ennen savukaasuluvua on oltava samat. Tietenkin kattilan käyttöaste on melkein suoraa verrannollinen siihen ilmavirtaan mikä johdetaan kat-

tilaan, mutta kuitenkin lämpötilat savukaasuissa vaihtelevat esim. polttoaineen mukaan.

On tietysti hankalaa etukäteen määrittää lämpötehon paranemista. Mutta ainahan voidaan olettaa jotain. Oletetaan lämpötehon paranevan puhtaampien lämpöpintojen ansiosta 0,2 MW. Näin ollen lämpötehosta saatu energiahyöty vuositason saadaan laskettu kaavalla

$$0,2 \text{ MW} \cdot 8040 \text{ h} \cdot 9,78 \text{ €/MWh} / 0,92 = 17093,7 \text{ €}. \quad (19)$$

- lämpötehon nousu = 0,2 MW
- kattilan käyntiaika = 8040 h
- kattilaenerghinta = 9,78 €/MWh
- kattilan hyötysuhde = 0,92

Näin laskettuna saadaan huomattava summa, mutta tämä on tietysti mielessä ironista, koska tällöinhän savukaasujen loppulämpötila pyrkii paremman lämmönsiirron johdosta laskemaan. Näin ollen joudutaan höyryluvolla esilämmittämään edelleen palamisilmaa, ettei happokastepiste alittuisi. Näin ajateltuna ei ole ihan yksiselitteistä määrittää lämpötehon energiahintaa. Tilanne on aivan toinen, jos savukaasujen loppulämpötila nousee turhan korkealle, eikä sitä saada laskettua muuten, kuin puhtaampien lämpöpintojen ansiosta. Tällainen tilanne on, jos ei ole, esim. höyryluvoa, tai se ei ole päällä ja siitä huolimatta savukaasun loppulämpötila vain nousisi. Tällöin voitaisiin laskea suoraan lämpöenerghinta parantuneen hyötysuhteen muodossa. Tässä tapauksessa hyöty tulisikin esille lähinnä suurilla kattilakuormilla, koska tällöin savukaasujen lämpötilat pyrkivät nousemaan. Erityisesti silloin kun lämpöpinnat ovat likaiset, koska lämmönsiirtoa ei tapahdu halutulla tavalla lämmönvaihtimissa.

Kaavalla 19 laskettu arvo ei välttämättä kerro todellisuutta, mutta se kertoo hyvin kuinka suurista rahoista on kyse. Oletetaan lopputuloksissa lämpötehon aiheutta-

man vuosisäästön olevan 8000 €. Tämä vastaa mielestäni ehkä paremmin todellista vuosisäästöä, mitä saadaan aikaan mahdollisella luvon lämpötehon nousulla. Tarkemmat tulokset voidaan määritellä tässäkin tapauksessa jälkikäteen. On huomioitava, että voi olla parempi vaihtoehto käyttää suuremmalla teholla höyryluvoa, koska näin höyryluvon jälkeisen ilman ja savukaasujen **lämpötilaerot** saadaan pienemmään. Tämä voi vähentää lämpöjännityksiä ja lisätä savukaasuluvon käyttöikä.

Esim. kuorenpolttokattiloilla ilman tulolämpötila savukaasuluvoon pyritään pitämään noin 80 °C:ssa, koska näin pyritään estämään kastepisteen alittuminen. Tässä tapauksessa tuloilmalle savukaasuluvoon asetetaan prosessiohjaukseen minimi lämpötila (höyryluvon tehonsäätö) jota ei normaali käytössä aliteta [12].

Ehkä tärkein ja selkein vertailukohta ääninuohoimin tehokkuutta määritettäessä on seurata luvon paine-eroa. Mahdollinen Paine-eron pienentyminen ”kielii” suoraan ääninuohoimien puhdistustehokkuudesta. Mielestäni luvo oli ainakin talviseisokin aikaan (2002/2003) todella likaisen näköinen (vrt. kuva 3). Juuri ennen talviseisokki luvo pyrkikin tukkiutumaan, joten nuohouskertoja oli pakko lisätä. Tukkiutuminen on havaittavissa kiinteällä paine-eromittauksella. Luvon paine-ero saa olla maksimissaan 30 mbar. Jos arvo ylittyy tulee siitä hälytys valvomon kuvaruudulle. Uskoin, että paine-erokin tulee jonkin verran laskemaan ääninuohoimien ansiosta (vrt. Espoon sähkön vertailuajo, kohta 8.1), koska ääninuohoimien nuohoussykli on huomattavasti tiheämpi kuin perinteisillä höyrynuohoimilla.

Pienempi paine-ero savukaasuluvossa vähentää ainakin savukaasupuhaltimien virrankulutusta, koska savukaasuvirta on vapaampaa tulipesästä savukaasupuhaltimille. Tämä voi vähentää myös haitallista kattilan huojuntaa (painevaihtelu), koska tulipesänpaine reagoi nopeammin ja herkemmin savukaasupuhaltimien säätäessä sitä. Tästä seuraavaa rahallista hyötyä on myös mahdoton tarkasti määrittää, mutta voidaan taas olettaa jotakin. Oletetaan savukaasupuhaltimien

virrankulutuksen pienenevän ”vain” 0,1 A/puhallin. Näin ollen voisi aiheutua säästöä vuositasolla

$$0,2 \text{ A} * 20000 \text{ V} * 16080 \text{ h} * 32,0 \text{ €/MWh} = 2058 \text{ €}. \quad (20)$$

- 16080 h = kahden puhaltimen yhteenlaskettu käyntiaika vuodessa
- 0,2 A = kahden puhaltimen yhteenlaskettu virrankulutuksen lasku
- 20000 V = kahden puhaltimen yhteenlaskettu käyttöjännite
- 32 €/MWh = sähköpörssin keskihinta (talvi 2002/2003)

Tämä voisi hyvinkin olla sitä suuruusluokkaa, mitä virrankulutuksen pienenemisellä saataisiin aikaan. Virrankulutuksen pieneneminen savukaasupuhaltimissa on suoraan verrannollinen luvon paine-eron pienenemiseen. Sama tilanne on myös primääri ja sekundääri puhaltimilla. Näidenkin puhaltimien virrankulutus saattaa laskea, jos paine-ero savukaasuluvon yli pienenee.

On myös tärkeää huomioida puhdistettavan kohteen likaisuusaste ennen ääninuohojen asennusta. Jos puhdistettava kohde on jo valmiiksi erittäin likainen, esim. kovettunut tuhka, niin ääninuohojet ei välttämättä irrota likaa toivotulla tavalla, kuten eivät välttämättä muutkaan nuohojet. Puhdistettavan kohteen tulisi olla mahdollisimman puhdas ennen ääninuohojen asentamista, jotta saataisiin paras mahdollinen hyöty koko kattilan käyntiajalle.

9 TULOSTEN KÄSITTELY

9.1 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuaika ääninuohoininvestoinnille saadaan laskemalla kohdassa 8 käydyt kohdat yhteen.

Taulukko 6. Säästöä ääninuohoininvestoinnilla vuositasolla

Höyryn energiahinta	2573 €
kupi-kustannukset (höyry)	1380 €
Savukaasupuhaltimien virransäästö (?)	2058 €
Luvon lämpötehon paraneminen (?)	8 000 €
Yhteensä	14 011 €

Taulukko 7. Ääninuohojen investointikustannukset

Laitteisto(+alv) + asennuskulut	26 000 €
kupi-kustannukset (ääni)	1150 €.
Paineilman kulutus	267 €.
Yhteensä	27 417 €

Säästö vuositasolla on 14 011 €. Näin laskettuna investoinnin takaisinmaksuaika on noin kaksi vuotta. Tulokseen pitää kuitenkin suhtautua varauksella, koska todellisia tehon paranemisia ei voida etukäteen tarkasti määrittää. Voi kuitenkin olla mahdollista, että saadut hyödyt ovat jopa paremmat kuin tällä tavalla lasketut.

Takaisinmaksuaika voidaan myös laskea faktojen pohjalta. Oletetaan, että ääninuohojen asennus ei parantaisi prosessia lainkaan, niin säästö olisi vuositasolla laskettuna yhteen höyryn energiahinta ja kupi-kustannukset 3953 €. Näin laskettuna takaisinmaksuaika olisi noin 7 vuotta.

On kuitenkin huomioitava, että kyseinen investointi kuitenkin pystyy maksamaan itsensä takaisin. Näin ollen jos nuohoimet on kuitenkin vaihdettava tulevaisuudessa, niin ainoat nuohoimet, jotka kannattaa asentaa savukaasuluvoon ovat ääninuohoimet.

Suurin mahdollinen hyöty ääninuohoimista voisi olla luvon kylmän puolen kennoston säästyminen vaihtamiselta. Kennoston vaihdosta aiheutuva kustannus on todella huomattavia (214 300 €). Näin ollen näyttäisi siltä, että mahdollisilla ääninuohoimilla saavutetut edut, voisivatkin tulla esille pitemmällä aikavälillä.

9.2 Ääninuohoimien käyttöohje

Ääninuohoimien käyttö:

Normaalitilassa pareittain 4 s:nin jaksoja 4 kertaa peräkkäin 9 s:nin välein. Ensin kuumapuoli ja heti perään kylmäpuoli. Taukoaika 16 min nuohouksen lopusta laskettuna. Olisi myös hyödyllistä käyttää ääninuohoimia höyrynuohouksen aikana tihennetyllä syklillä. Tihennetty sykli on muuten sama, kuin normaali tilanteessa paitsi taukoaika on 8 min.

9.3 Savukaasujen loppulämpötilan määrittäminen

Savukaasujen loppulämpötilaa määritettäessä pitää olla selvillä savukaasujen koostumuksesta. Kuitenkin savukaasukemia on äärimmäisen hankalaa, ja siinä on niin monta eri tekijää joiden teoreettinenkin hallinta on puutteellista. Ainakin teoriassa tähän vaikuttaa savukaasujen vesi- ja rikkiatrioksidi pitoisuus. Polttoaineen kosteuteen on hanka vaikuttaa, mutta Rikkiatrioksidipitoisuuteen voidaan vaikuttaa. Käytännölliset keinot ovat: yli-ilmamäärän rajoittaminen ja kalkin syöttö tulipesään. Tätä kautta voi olla jopa mahdollista laskea savukaasujen loppulämpötilaa jonkin verran. On kuitenkin muistettava, että suuria savukaasujen lämpötilamuutoksia ei

pidä tehdä. Kalkin syötön myötä, myös ilmanlaatu paranee ja se on merkittävää mitataan sitä millä keinoilla tahansa.

Savukaasujen loppulämpötilan määrittäminen onkin aikalailla kokeilun tulosta, mutta tässä tapauksessa kun polttoaine ei ole homogeenista saattaa happokastepistelämpötila vaihdella hyvinkin paljon. Näin ollen jos rikkiä ei saada poistettu kalkin avulla, niin on perusteltua nostaa savukaasujen loppulämpötilaa ainakin silloin kun joudutaan ajamaan hiiltä kattilaan. Helpointa tämä olisi jos saataisiin konkreettinen mittatulos siitä, että happokastepistelämpötila on saavutettu.

10 YHTEENVETO

Työ oli luonteeltaan tutkimuksellinen ja varsin mielenkiintoinen. Ääninuohoinvestoinnin takaisinmaksuaika oli varsin hankalasti määritettävissä. Tilanne olisi ollut aivan toinen, jos ko. nuohoimet olisi saatu asennettua kohteeseen työn aikana. Kuitenkin eri voimalaitoksista saadut kokemukset ääninuohoimista ovat olleet positiivisia, joten tässäkin tapauksessa uskoisin niistä olevan hyötyä ainakin jossain määrin työn tilaajan kattilassa.

Työssä onnistuttiin määrittämään kuitenkin ne osatekijät, joihin mahdolliset ääninuohoimet vaikuttavat. Lisäksi saatiin määriteltyä ääninuohoimien käyttöohje ja niiden positiot.

Savukaasujen loppulämpötilan määrittämiseen onnistuttiin selvittämään varsin hyvin ne osatekijät, mitkä siihen vaikuttaa. Lisäksi ympäristönäkökohtien huomioiminen työn tilaajan kattilassa, olisi saavutettavissa kohtuullisilla lisäinvestoinneilla. Ilmanlaadun paraneminen on kaikkien etu ja se on rahassa mitattuna mittaamattoman arvokasta. Mahdollinen kalkinsyöttö pitää vain järjestää tulipesään mahdollisimman tasaisesti sillä ajanhetkellä, kun tiedetään polttoaineen sisältävän rikkiä. Työn tuloksena saatu laskentataulukko (liite C) on hyvä apuväline, kun halutaan määrittää syötettävää kalkin määrää tulipesään. Taulukolla voidaan määrittää myös varsin tarkasti savukaasujen koostumus, sekä palamishapen määrä. Palamishapen tarpeen määrittäminen voi olla hyödyllistä, jos esim. hapenmittaus savukaasukanavassa on vioittunut. Näin voidaan määrittää tarvittava palamishapen määrä kun tiedetään polttoaineen määrä ja koostumus.

Tulevaisuudessa näyttääkin siltä, että voimalaitoksissa on yhä enemmän paneuduttava palamiseen liittyvään kemiaan. On ymmärrettävä savukaasujen koostumuksesta ja päästöjen laadusta, koska ympäristönäkökohdat näyttävät korostuvan yhä vain enemmän.

LÄHDELUETTELO

- 1 Mikko Kara. Energia suomessa 1999. ISBN 951-37-2745-9
- 2 Matti Hellgren, Lauri Heikkinen, Lauri Suomalainen. Energia ja ympäristö 1996. ISBN 951-719-674-1
- 3 Höyrykattila tekniikka. Edita/opetushallitus. 1999 ISBN 951-37-3360-2
- 4 [www-dokumentti] (luettu 4.12.2002)
<<http://ylivieska.cop.fi/karip/Kursseja/polttotekniikka/Nuohous/H%C3%B6yry9t.htm>>.
- 5 [www-dokumentti] (luettu 4.12.2002)
<<http://www.automation.hut.fi/edu/as84134/joronen2.pdf>>.
- 6 Arto Arvonen, Hannu Levonen. Opistoasteen kemia 6. painos 1996. ISBN 951-1-06981-0
- 7 [WWW-dokumentti] (luettu 28.12.2003)
<<http://www.ac.tut.fi/aci/courses/76551/P302.pdf>>.
- 8 Tutustumiskäynti: Fortumin haapaveden voimalaitoksella 25.11.2002
- 9 Puhelinkeskustelu 10.12.2002: projektiesimies Kari Kinni
Imatran Hitsauspalvelu
- 10 Puhelinkeskustelu 11.3.2003: VTT:n tutkija M. Mäkipää
- 11 Nirafon Oy:n esite
- 12 Puhelinkeskustelu 11.3.03: Metso T. Joronen (prosessiohjauksen asiantuntija)
- 13 Puhelinkeskustelu 11.3.03: VTT:n tutkija M. Orjala